

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ



Духота Олександр Іванович

УДК 620.194; 621.891

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ
ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНИХ ТРИБОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ЗА УМОВ ЇХ
ФРЕТИНГ-КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ**

Спеціальність 05.02.04 – тертя та зношування в машинах

Галузь знань 13 – механічна інженерія

Автореферат дисертації
на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному авіаційному університеті.

Науковий консультант: член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор
Кіндрачук Мирослав Васильович,
Національний авіаційний університет, завідувач кафедри
машинознавства.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор **Диха Олександр
Володимирович**, Хмельницький національний університет,
завідувач кафедри зносостійкості і надійності машин;

доктор технічних наук, професор **Івченко Леонід Йосипович**,
Запорізький національний технічний університет, директор
машинобудівного інституту;

доктор технічних наук, професор **Аулін Віктор Васильович**,
Центральноукраїнський національний технічний університет,
професор кафедри експлуатації та ремонту машин.

Захист дисертації відбудеться «__» березня 2019 р. о _____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.06 в Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1, корпус 11, ауд. 220.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1, корпус 8.

Автореферат розісланий «__» лютого 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
к.т.н., с.н.с.



О. Ю. Корчук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку технічного прогресу за загальної тенденції до зниження матеріалоємності, зменшення жорсткості конструкцій, зростання робочих навантажень та вимог до економічної ефективності використання машин, питання підвищення їх надійності і довговічності набувають виключно важливого значення. У вирішенні цієї фундаментальної загальнотехнічної проблеми одне із ключових місць належить забезпеченню високого рівня зносостійкості та терміну безвідмовного функціонування деталей і вузлів трибомеханічних систем. За різними оцінками від 60% до 90% несправностей і відмов у роботі машин і механізмів виникає унаслідок зносу і пов'язаних з ним руйнуванням деталей.

Серед трибомеханічних систем найбільш обмеженої довговічності в конструкції повітряних суден (ПС) і авіаційних двигунів (АД) виділяють трибосистеми малорухомих і номінально-нерухомих вузлів і з'єднань, деталі яких зазнають малих відносних вібраційних переміщень. Такий вид фрикційної взаємодії тіл отримав назву “фретинг” або “фретинг-процес”, а відповідний йому вид зношування, що розвивається на поверхні металів в окиснювальному середовищі – “фретинг-корозія”. В інженерній практиці і практиці трибологічних досліджень фретинг-корозія розглядається як один із найбільш руйнівних, важкопередбачуваних і небезпечних проявів поверхневого руйнування деталей. Проблема боротьби з фретинг-корозією уже протягом багатьох років знаходиться в центрі уваги фахівців різних галузей машинобудування, проте і на тепер вона залишається не в повній мірі вирішеною.

Необхідність підвищення довговічності деталей і вузлів авіаційної техніки (АТ), що піддаються фретинг-корозійному зношуванню, постійно виникає у зв'язку із освоєнням випуску нових типів ПС і АД з більш високими тактико-технічними характеристиками і строками служби, застосуванням в їх конструкції нових технічних рішень та матеріалів, при вирішенні завдань відновлення при ремонті та продовження ресурсу. В той же час, існуючі методи поверхневого зміцнення і відновлення деталей, що застосовуються в практиці авіабудування і ремонту АТ, в багатьох випадках уже вичерпали свої можливості і не задовольняють все більш зростаючим вимогам до забезпечення високого рівня експлуатаційної надійності авіаційних трибомеханічних систем.

Складність захисту від фретинг-корозії значною мірою обумовлена відсутністю достатньо повного розуміння щодо механізмів керування процесами зношування, критеріїв та методів оцінювання та прогнозування працездатності трибосистем з урахуванням різних форм прояву фретинг-корозії і умов фретинг-контактної взаємодії деталей. Традиційні підходи загальних теорій тертя та зношування до забезпечення зносостійкості деталей і спряжень для умов фретинг-корозії не завжди дають позитивний результат. У зв'язку з цим, актуальною науково-технічною проблемою, на вирішення якої спрямоване дослідження дисертаційної роботи, є розробка науково обґрунтованих підходів до забезпечення високого і прогнозованого рівня довговічності деталей авіаційних трибомеханічних систем шляхом створення методів формування функціональних поверхонь і матеріалів з

необхідними керованими властивостями та методів оцінювання і прогнозування фретинг-корозійної сумісності та зносостійкості елементів трибосистем.

Вирішення цього складного завдання потребує всебічного аналізу причинно-наслідкових зв'язків пошкодження деталей авіаційних конструкцій фретинг-корозією, глибокого експериментального вивчення закономірностей і механізмів фретинг-корозійного зношування, встановлення та теоретичного обґрунтування принципів створення поверхнево-модифікованих шарів, матеріалів і захисних покриттів підвищеної фретингостійкості.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі Технологій виробництва та відновлення авіаційної техніки Національного авіаційного університету. Дослідження за темою дисертації проводились в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт: №386-ДБ07 (0107U002739) «Розробка науково-технічних основ формування покриттів триботехнічного призначення на сплавах титану і алюмінію». Здобувачем проводились дослідження впливу технологічних факторів на формування структурно-фазового складу і триботехнічні властивості покриттів трибологічного призначення на сплавах титану; №718-ДБ11 (0111U01639) «Науково-методологічні основи підвищення довговічності і ресурсу деталей, що працюють в умовах контактної взаємодії». Здобувачем розроблено аналітично-розрахунковий метод оцінювання фретинг-корозійної сумісності матеріалів пар тертя, структурно-реологічні принципи створення дисипативних зносостійких поверхнево-модифікованих шарів і захисних покриттів. Теоретично обґрунтовано вибір складу і способу формування високотемпературних зносостійких матеріалів для трибовузлів деталей гарячої частини ГТД, виконано дослідження з встановлення закономірностей і механізмів зношування матеріалів в умовах високотемпературної фретинг-корозії; №947-ДБ14 (0114U001604) «Фізико-технологічні основи комбінованих методів формування зносостійких покриттів на титанових сплавах деталей авіаційної техніки». Здобувачем виконано дослідження з визначення триботехнічних властивостей в умовах фретинг-корозії покриттів, сформованих методами газотермічного напилювання та комбінованими методами; №008-ДБ92 (01930017660) «Разработка метода выбора покрытий и справочных данных о триботехнических свойствах покрытий, применяемых с целью упрочнения и восстановления элементов машин и механизмов, работающих в условиях фреттинг-коррозии». Здобувачем розроблено критерії оцінювання працездатності та методика вибору захисних покриттів для деталей трибовузлів, що пошкоджуються фретинг-корозією; №620ГА-95 (0195U0028595) «Разработка информационного комплекса износостойкости конструкционных материалов и покрытий, работающих в условиях фреттинг-коррозии». Здобувачем виконана систематизація деталей авіаційних трибомеханічних систем за умовами виникнення фретинг-пошкоджень та визначені їх діагностичні ознаки. Дисертаційні дослідження проводились також при виконанні науково-дослідних робіт за госпрозрахунковими договорами та договорами про науково-технічну співпрацю з ДП «Антонов», ДП «Завод 410 цивільної авіації», ДП «Конотопський авіаремонтний завод «Авіакон», ДП «Луцький авіаремонтний завод «Мотор» та за планами держбюджетних науково-дослідних робіт кафедри. У

зазначених роботах здобувач приймав безпосередню участь як виконавець та відповідальний виконавець.

Мета і завдання дослідження.

Мета дослідження: на підставі експериментальних досліджень закономірностей зношування та фізичного моделювання трибологічних процесів розробити наукові засади керування зносостійкістю та практичні рішення щодо формування зносостійких поверхонь для підвищення довговічності деталей авіаційних трибомеханічних систем, що працюють в умовах фретинг-контактної взаємодії.

Для досягнення поставленої мети визначені наступні **основні завдання:**

- на основі аналізу стану конструктивно-технологічного забезпечення зносостійкості деталей авіаційних трибомеханічних систем обґрунтувати актуальність досліджень, спрямованих на вирішення проблеми підвищення довговічності деталей, що працюють в умовах фретинг-контактної взаємодії;

- для різного класу конструкційних сплавів встановити вплив природи матеріалів контактної пари, геометрії контакту, параметрів і схем віброконтактного навантаження на закономірності перебігу процесів фретинг-корозійного зношування. Розкрити механізми трибологічних процесів, що відповідають за інтенсивність поверхневого руйнування матеріалів та визначити критерії оцінювання їх фретинг-корозійної сумісності і зносостійкості;

- розробити концепцію формування поверхнево-модифікованих шарів і захисних покриттів підвищеної зносостійкості. Експериментально встановити закономірності впливу хімічного, структурно-фазового складу, фізико-механічних характеристик, технологічних параметрів і схем їх формування на триботехнічні властивості;

- теоретично обґрунтувати підхід до вибору складу компонентів і принципу конструювання зносостійких сплавів для трибовузлів, що працюють в екстремально високих температурних умовах. Для визначеного класу сплавів встановити закономірності впливу їх хімічного, структурно-фазового складу і температури на зносостійкість в умовах високотемпературного фретингу;

- на основі експериментальних досліджень та фізичного моделювання процесів, що розвиваються в зоні трибологічного контакту, сформулювати системні уявлення щодо механізмів забезпечення підвищеної зносостійкості сплавів в умовах високотемпературного фретингу;

- для умов фретинг-корозійного зношування розробити аналітично-розрахунковий метод оцінювання зносостійкості поверхневих шарів;

- на основі результатів досліджень розробити і рекомендувати для підприємств авіапромислового комплексу і підприємств споріднених галузей машинобудування практичні рішення щодо підвищення довговічності деталей трибомеханічних систем.

Об'єкт дослідження – процеси фретинг-контактної взаємодії та зношування у трибомеханічних системах та механізми керування цими процесами.

Предмет дослідження – закономірності та механізми зношування, критерії і прогноуючі моделі оцінювання працездатності та методи підвищення довговічності

деталей авіаційних трибомеханічних систем за умов їх фретинг-контактної взаємодії.

Методи дослідження. При виконанні дисертаційної роботи використовувались методи триботехнічних досліджень, методи випробувань на втому, металографічні та металофізичні методи досліджень, методи фізичного, математичного та чисельного комп'ютерного моделювання.

Аналіз і обґрунтування результатів досліджень виконувались на основі сучасних положень трибології, фізики міцності твердих тіл, термодинаміки незворотних процесів відкритих систем, інженерії поверхні та матеріалознавства.

Результати експериментів обробляли і узагальнювали методами математичної статистики та математичного аналізу.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Для умов фретинг-корозійного зношування розроблено аналітично-розрахунковий метод оцінювання зносостійкості поверхневих шарів, який дозволяє описувати і аналізувати зміну фізичного стану матеріалу поверхневого шару та визначати енергетичну умову його руйнування.

2. Вперше для трибосистем, втрата працездатності яких пов'язана з накопиченням в зоні трибоконтакту продуктів зношування, запропоновано розрахунково-аналітичний метод оцінювання фретинг-корозійної сумісності матеріалів.

3. Встановлено закономірності і механізми трибологічних процесів, що визначають зміну інтенсивності фретинг-корозійного зношування залежно від природи матеріалів контактної пари, схеми контакту, параметра відносного зміщення поверхонь та параметрів фретингу. Розкрито механізм інтенсифікації зношування матеріалів при поєднанні фретингу з дією нормальних до поверхні контакту динамічних навантажень.

4. Вперше встановлено підпорядкованість розподілу випадкових похибок величин фретинг-корозійного зносу нормальному статистичному закону розподілу. Встановлено закономірність та механізми впливу природи матеріалів та амплітудно-силових параметрів фретингу на статистичні характеристики розсіювання величини зносу.

5. Розроблено загальну концепцію та структурно-реологічні принципи керування зносостійкістю динамічно-навантажених трибосистем, які ґрунтуються на енергетичній моделі трибопроцесів та структурно-реологічних механізмах дисипації енергії у трибологічному контакті і можуть бути теоретичною основою для створення поверхневих структур та матеріалів з підвищеним опором фретинг-корозійному зношуванню.

6. Вперше методом скінченно-елементного аналізу встановлено закономірності розподілу додаткових напружень, що виникають в системі «зносостійке покриття – металева основа» від дії температур фрикційного нагріву та визначені шляхи їх мінімізації.

7. Закладено наукові основи створення матеріалів, стійких до зношування в умовах високотемпературного фретингу з робочою температурою до 1273 К.

Практичне значення одержаних результатів.

Одержані в дисертаційній роботі теоретичні і експериментальні результати дозволяють цілеспрямовано, на основі встановлених закономірностей і принципів керування зносостійкістю, розробляти та впроваджувати конструктивно-технологічні заходи з підвищення довговічності деталей та вузлів авіаційних трибомеханічних систем, що піддаються фретинг-корозійному зношуванню.

За комплексом виконаних досліджень запропоновано аналітично-розрахунковий метод оцінювання фретинг-корозійної сумісності матеріалів контактних пар, розроблено концептуальний підхід до створення трибологічно ефективних технологій формування фретингостійких поверхонь. Розроблено та захищено деклараційними патентами України зносостійкий антифрикційний керамічний матеріал на основі ZrB_2 для поверхневого зміцнення деталей методом електроіскрового легування (Пат. 89119, опубл. 25.11.2009, Бюл. №24), високотемпературні зносостійкі сплави для трибовузлів гарячої частини ГТД (Пат. 69065, опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8, Пат. 111036, опубл. 10.07.2015, Бюл. № 13), способи отримання захисних функціональних покриттів з підвищеними експлуатаційними властивостями (Пат. 45548, опубл. 10.11.2009, Бюл. №21; Пат. 45549, опубл. 10.11.2009, Бюл. №21; Пат. 65209, опубл. 25.11.2011, Бюл. №22; Пат. 98452, опубл. 27.04.2015, Бюл. №8).

Результати дисертаційної роботи використані при розробці технологічних рекомендацій по відновленню і підвищенню зносостійкості контактних поверхонь робочих лопаток турбіни ГТД, технологічних рекомендацій по відновленню рейок механізацій крила літаків, рекомендацій з розширення ремонтних допусків на знос отворів розкосів підредукторних рам гелікоптерів, а також сприяли впровадженню сучасних вискоефективних технологій інженерії поверхні та матеріалів триботехнічного призначення для вирішення практичних завдань підвищення надійності і довговічності об'єктів АТ.

Розроблені матеріали, способи формування зносостійких функціональних поверхонь та технологічні рекомендації щодо підвищення експлуатаційних властивостей і довговічності деталей трибомеханічних систем пройшли апробацію і використані на підприємствах авіапромислового комплексу та споріднених галузях: ДП «Антонов», ДП «Луцький авіаремонтний завод “Мотор”», ОАО «Мотор Січ», ДП “Завод 410 цивільної авіації”, ДП “Конотопський авіаремонтний завод” “Авіакон”, ПрАТ «ОТІС». Ефективність і практичну цінність розробок підтверджено актами виробничих випробувань.

Особистий внесок здобувача. Всі експериментальні дослідження з визначення закономірностей і механізмів фретинг-корозійного зношування, основні наукові положення і практичні результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, виконані здобувачем самостійно. У публікаціях, написаних у співавторстві особистий внесок здобувача такий: [1] – одержані кількісні показники розподілу деталей об'єктів АТ за видами експлуатаційних дефектів, виконано аналіз причинно-наслідкових зв'язків втрати працездатності деталей авіаційних трибомеханічних систем; [2] – обґрунтовано доцільність застосування енергетичної моделі трибопроцесу до аналізу фретинг-корозійного руйнування поверхневих шарів, отримані аналітичні розрахункові залежності оцінювання їх зносостійкості ;

[3] – обґрунтована актуальність дослідження зносостійкості деталей авіаційних трибомеханічних систем в умовах динамічного контактного навантаження, проаналізовано причини, що обумовлюють високу інтенсивність зношування таких деталей; [4] – розроблено алгоритм проведення досліджень з оцінювання ремонтпридатності зношуваних деталей; [5] – визначені умови щодо формування оптимальних властивостей систем «покриття-основа» та вимоги до складу газотермічно-напилених покриттів для забезпечення їх високої фретингостійкості; [6] – проведені випробування на зношування електроіскрових та комбінованих лазерно-електроіскрових покриттів сформованих із композиційних керамічних матеріалів на сплавах ВТ20 і АЛ-25, проаналізовані кореляційні зв'язки між структурно-фазовим складом покриттів і їх зносостійкістю; [7] – проаналізовано причини низької зносостійкості та втрати працездатності деталей із титанових сплавів в вузлах тертя АТ; [8] – виконано аналіз експериментальних результатів з встановлення ефективності досліджуваних технологічних заходів запобіганню втомному руйнуванню деталей з газотермічними покриттями; [9] – проведені експериментальні дослідження з визначення триботехнічних властивостей трибосистем з дискретно-текстурованими мастилоємними поверхнями при фретинг-корозії за умов граничного тертя; [10, 11] – прийнято участь в проведенні досліджень і аналізі результатів з визначення триботехнічних властивостей композиційних високотемпературних сплавів на основі Со в умовах високотемпературного фретингу; [12] – прийнято участь в проведенні експериментальних досліджень і аналізі результатів з визначення впливу технології формування електроіскрових твердосплавних покриттів на їх зносостійкість при фретинг-корозії; [13] – проаналізовано результати термодинамічного аналізу процесів високотемпературного окислення сплавів системи $\text{Co}(\text{Cr}; \text{Al}; \text{Fe})\text{TiC}$; [14] – прийнято участь в аналізі результатів досліджень впливу формування дискретно-текстурованої поверхні на фретинг-втомну міцність сталі 30ХГСА; [15] – виконані дослідження впливу параметрів дискретно-структурованих мастилоємних поверхонь на фретингостійкість сталі 30ХГСА в умовах граничного тертя; [16, 17] – проведені випробування на зношування при фретинг-корозії електроіскрових та комбінованих лазерно-електроіскрових ZrB_2 –вмістних покриттів на титановому сплаві ВТ3-1, запропоновано механізм розвитку трибологічних процесів, що забезпечує їх високу фретингостійкість; [18] – розроблено програму досліджень та проведено аналіз отриманих результатів випробувань; [19] – прийнято участь в проведенні огляду розвитку методів формування дискретно-текстурованих поверхонь та ефективність їх застосування в трибологічних системах; [20] – виконано аналіз проблематики створення високотемпературних матеріалів для трибовузлів гарячої частини ГТД та визначенні завдання, які потрібно вирішити при розробленні таких матеріалів; [21] – визначені кількісні показники фретинг-зносу для різного поєднання матеріалів пар тертя, розроблено аналітично-розрахунковий метод оцінювання фретинг-корозійної сумісності матеріалів; [24] – проведені експериментальні дослідження з визначення впливу пористості, вмісту карбідної фази і температури на зносостійкість композиційних порошкових сплавів систем Co-TiC , Ni-TiC , ЖС32-TiC в умовах фретинг-корозії; [25] – прийнято участь у виконанні експериментальних досліджень та аналізі отриманих результатів; [26] – проведено експериментальні дослідження

впливу технологічних параметрів формування дискретно-текстурованих мастилоємних поверхонь на фретингостійкість трибосистем, запропоновано механізм руйнування поверхонь при фретингу в умовах граничного тертя; [27] – проведено експериментальні дослідження з визначення статистичних характеристик величини фретинг-зносу та прийнята участь в аналізі результатів дослідження; [28-31; 37; 39] – проведені випробування на зношування покриттів при фретинг-корозії та прийнята участь в аналізі результатів дослідження; [32, 33] – встановлено взаємозв'язок фретингостійкості досліджуваних композиційних сплавів з їх хімічним і структурно-фазовим складом; [34] – прийнята участь в аналізі результатів дослідження впливу режиму хіміко-термічної обробки на поверхневу міцність титанового сплаву VT22; [35] – проведено дослідження триботехнічних властивостей і циклічної міцності зразків сплаву VT8 з детонаційним покриттям системи WC-Co; WC-Ni; [36] – виконано аналіз експлуатаційних пошкоджень контактних поверхонь робочих лопаток турбін ГТД, прийнято участь в аналізі результатів дослідження з визначення зносостійкості при високих температурах жароміцних сплавів; [38] – встановлено взаємозв'язок вмісту карбідної фази, параметрів напружено-деформованого стану поверхневого шару та зносостійкості матрично-наповненого композиційного матеріалу; [40] – запропоновано системний підхід до вибору матеріала і методу нанесення покриттів для відновлення і захисту деталей, що пошкоджуються фретинг-корозією; [41] – сформульовані принципи керування зносостійкістю матеріалів за умов розвитку фретинг-процесів та визначені перспективні напрями створення фретингостійких поверхонь; [42] – запропоновано механізм регенерації граничних мастильних шарів в трибосистемах з дискретно-текстурованою поверхнею; [43] – проведені експериментальні дослідження з визначення зносостійкості матеріалів наплавов в умовах високотемпературного фретингу; [44] – проаналізовано напрямки практичної реалізації технологій створення фретингостійких поверхонь; [45] – проведено дослідження з визначення триботехнічних властивостей композиційних газотермічних покриттів в умовах фретинг-корозії; [46] – виконано аналітичне дослідження процесу фретингового руйнування поверхневих шарів; [47] – визначені критерії оцінювання працездатності та сформульовані принципи вибору матеріалів пар тертя; [48] – запропоновано принципи керування зносостійкістю і конструювання матеріалів стійких до зношування в умовах високотемпературного фретингу; [49] – прийнято участь в розробці конструктивної схеми випробувального пристрою; [50] – запропоновано спосіб підвищення зносостійкості плазмового покриття та сформульована формула корисної моделі; [51] – запропоновано спосіб підвищення зносостійкості азотованих сталевих виробів, сформульована формула корисної моделі; [52] – прийнято участь у визначенні складу композиту та виконанні досліджень триботехнічних властивостей електроіскрових покриттів, сформованих із матеріалу, що заявляється; [53] – запропоновано спосіб підвищення зносостійкості газотермічних покриттів термоциклічною лазерною обробкою; [54; 56] – приймав участь у визначенні складу сплавів, що заявляються та виконано дослідження з визначення їх триботехнічних властивостей; [55] – виконано дослідження контактно-втомної міцності і фретингостійкості покриттів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались й обговорювались на науково-технічних конференціях і симпозіумах: II Міжнародній конференції «Динаміка роторних систем» (Кам'янець-Подільський, 1998р.); VIII, IX, XI Міжнародних науково-технічних конференціях «Авіа-2007», «Авіа-2009», «Авіа-2013» (Київ, 2007 р., Київ 2009 р., Київ 2013 р.); Міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасні проблеми машинознавства» (Київ, 2008 р., Київ, 2013 р.); II Міжнародній Самсоновській конференції «Матеріалознавство тугоплавких соединений» (Київ, 2010 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми трибології» (Київ, 2010 р.); 3-й, 5-й Міжнародних науково-технічних конференціях «Теорія і практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій» (Львів, 2012 р., Львів, 2015 р.); 11-му, 12-му, 13-му Міжнародному симпозіумі українських інженерів механіків у Львові (Львів, 2013 р., Львів, 2015 р., Львів, 2017 р.); The Sixth world congress "Aviation in the XXI-st century: safety in aviation and Space technologies" (Kyev, 2014); V Міжнародній науково-технічній конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах» (Київ, 2015 р.); The International scientific and technical conference "VI Ukrainian-Polish Scientific Dialogues" (Khmelnitsky, 2015 р.).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 56 наукових праць, у тому числі: 1 монографія, 1 колективна монографія, 32 статті у фахових виданнях з переліку МОН України, з них 8 у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз; 14 матеріалів та тез доповідей на науково-технічних конференціях, 1 авторське свідоцтво та 7 патентів на винахід.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота викладена на 405 сторінках машинописного тексту, складається із анотації, вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатку. Обсяг основного тексту дисертації складає 303 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 32 таблицями та 124 рисунками. Список використаних джерел містить 355 найменувань, з них 313 кирилицею та 42 латиницею.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розкрито сутність наукової проблеми, обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та основні завдання дослідження. Подано інформацію про методи дослідження, наукову новизну і практичну значимість отриманих результатів, відомості стосовно практичного застосування результатів, їх апробації та особистого внеску здобувача.

У першому розділі розглянуто питання, пов'язані з вирішенням загальної проблеми забезпечення надійності трибомеханічних систем, проведено аналіз стану трибологічного забезпечення надійності об'єктів АТ та стану досліджень з проблематики зношування і конструктивно – технологічних методів боротьби з фретинг-корозією. Обґрунтовано актуальність теми та визначені основні напрямки дослідження.

Проаналізовано процеси, що відбуваються у трибологічних системах і відповідають за втрату їх працездатності. Показано, що переважна більшість

несправностей і відмов у роботі машин і механізмів виникає внаслідок зношування і пов'язаних з фрикційно – контактною взаємодією руйнувань деталей. За різними оцінками їх частка в загальній кількості дефектів для складних механічних систем складає від 60% до 90%. Тому проблема забезпечення високих показників контактної міцності і зносостійкості деталей і елементів конструкції машин є невід'ємною і важливою складовою підвищення їх надійності і ресурсу.

Розглянуто сучасні уявлення щодо природи зовнішнього тертя та механізму зношування металів. Найбільш важливими фундаментальними положеннями, на яких ґрунтуються сучасні теорії тертя та зношування, є положення про дискретність контакту реальних поверхонь, що формує умову механізму втомного руйнування поверхневих шарів, концепції енергетичної моделі трибопроцесів, структурної пристосованості матеріалів та саморегулювання процесів тертя та зношування, структурно – реологічних механізмів релаксації напружень і дисипації підведеної до трибосистеми механічної енергії. Зроблено висновок, що на сьогодні не одна із існуючих теорій не дає можливість сформулювати універсальні принципи керування всією сукупністю процесів, що відповідають за зносостійкість деталей вузлів тертя. Вирішення задач створення високоресурсних зносостійких функціональних поверхонь потребує врахування конкретних умов фрикційно–контактної взаємодії і механізму зношування елементів трибоспряжень.

Результати кількісного аналізу щодо причин втрати працездатності деталей авіаційних трибомеханічних систем свідчать, що серед великої різноманітності видів зношування, найбільший відсоток припадає на зношування внаслідок розвитку фретинг-корозії. Такий вид зношування притаманний більшості деталей номінально-нерухомих вузлів і з'єднань, які під час ремонту підлягають заміні або відновленню, а також складають один із основних видів дефектів, що спричиняють виникнення несправностей і відмов АТ в процесі експлуатації.

Аналіз досліджень з проблематики фретинг-корозійного зношування та стану трибологічного забезпечення працездатності деталей вузлів тертя показав, що технологічні методи, які застосовуються на сьогодні в практиці авіабудування і ремонту АТ для підвищення контактної міцності і зносостійкості, в багатьох випадках не задовольняють все більш жорстким умовам роботи трибоспряжень та зростаючим вимогам до надійності і ресурсу АТ. Не дивлячись на вагомі здобутки з встановлення закономірностей зношування та накопичений досвід боротьби з фретинг-корозією, на сьогодні повного розуміння щодо механізмів та принципів керування зносостійкістю функціональних поверхонь, критеріїв та методів оцінювання і прогнозування працездатності трибосистем немає. На практиці вирішення задач з підвищення фретингостійкості деталей і спряжень здійснюється переважно емпірично - пошуковим шляхом без достатнього теоретичного обґрунтування. Це обумовлює необхідність поглибленого вивчення закономірностей і механізмів фретинг-корозійного зношування, розробки науково-обґрунтованих принципів створення матеріалів, поверхнево-модифікованих шарів і захисних покриттів підвищеної зносостійкості з урахуванням різних форм прояву фретинг-корозії і умов фрикційно-контактної взаємодії деталей авіаційних трибомеханічних систем. Складний і важкопередбачуваний характер цього виду зношування та об'єктивно існуюча на сьогодні тенденція до проектування авіаційних конструкцій

за принципом високої живучості та рівноресурсності з мінімально безпечним запасом міцності ставить проблему забезпечення високої фретингостійкості елементів конструкції і з'єднань об'єктів АТ в ряд найбільш важливих завдань. На підставі означеної науково-технічної проблеми визначено мету і завдання дисертаційного дослідження.

У другому розділі подано методики експериментальних досліджень.

Триботехнічні дослідження проводились за стандартним методом згідно ГОСТ 23.211-80 та за спеціально розробленими методиками на установках, що моделюють роботу трибоспряджень в умовах малих тангенціальних вібропереміщень та нормальному до поверхні контакту динамічному навантаженню. В основу методології триботехнічних досліджень покладено комплексне дослідження кількісних (знос, інтенсивність зношування, коефіцієнт тертя) та якісних (характер руйнування поверхонь, зміна структурно-фазового та хімічного складу поверхонь в процесі тертя) показників. Використане для триботехнічних досліджень устаткування дозволяє реалізовувати різні схеми контакту та проводити випробування на зношування матеріалів в широкому спектрі амплітудно-силових параметрів фретингу і температур. Оцінювання величини зносу проводилось ваговим методом за втратою маси зразків та за величиною лінійного зносу.

Випробування на втому проводилось згідно ГОСТ 23026-78 на установці МУИ-6000 в умовах чистого згину з обертанням. Дослідження топографії поверхонь тертя, структурних перетворень, зміни хімічного складу і властивостей матеріалу поверхневих шарів в зоні фрикційного контакту, а також хімічного, структурно-фазового складу та властивостей поверхнево-модифікованих шарів і захисних покриттів проводили методами оптичної та електронної растрової мікроскопії, мікрорентгеноспектрального і рентгенівського фазового аналізу, методами трибоспектрального індентування, мікродюрометрії та Оже- спектроскопії з використанням сучасного вітчизняного та закордонного устаткування. Застосування комплексу зазначених металофізичних методів дослідження дозволило здійснити поглиблений аналіз закономірностей і механізмів розвитку трибологічних процесів у досліджуваних трибосистемах. Математичне планування і обробка експериментальних результатів виконувались методами математичної статистики і математичного аналізу із застосуванням пакету прикладних комп'ютерних програм «ПРІАМ».

У третьому розділі досліджено вплив природи матеріалів контактної пари, геометричних параметрів трибоконтакту і параметрів фретингу на умови формування трибоструктури поверхонь тертя і фрикційнозносні характеристики трибосистем.

На першому етапі виконано експериментальні та аналітичні дослідження з визначення фретинг-корозійної сумісності матеріалів пар тертя. Враховуючи значне поширення в авіаційних конструкціях титанових сплавів, дослідження проводились на прикладі поєднання титанового сплаву ВТ8 з конструкційними сплавами на основі Al, Cu, Mg, Fe та з одноіменним сплавом. Такий підхід до вибору матеріалів контактних пар дав можливість проаналізувати взаємозв'язок стійкості до фретинг-корозії як з природою і властивостями самих матеріалів пари тертя, так і з природою і властивостями продуктів їх зношування. За результатами досліджень, з

урахуванням форм впливу фретинг-корозії на працездатність деталей і спряжень, запропоновано критерії оцінювання сумісності матеріалів у фретинг-парі. Встановлено, що у трибосистемах, працездатність яких втрачається внаслідок зменшення у спряженні натягу (з'єднання з гарантованим натягом) або збільшенням зазору (з'єднання з гарантованим зазором) для мінімізації зносу необхідно поєднувати матеріали, продукти зношування яких здатні до кооперативного формування захисних поверхневих структур за механізмом трибоактивованого ущільнення і спікання. В цьому випадку, для поєднання сплаву ВТ8 у фретинг-парі із сплавами на основі кольорових металів, перевагу необхідно віддавати сплавам на основі Cu, а із сплавів на основі Fe- корозійностійким аустенітним сталям перед високоміцними загартованими сталями (рис.1).

Відносно невеликий знос елементів трибопари ВТ8-БрАЖ 9-4 пояснюється формуванням на поверхні тертя титанового сплаву комбінованого захисного прошарку із продуктів зношування і перенесених з контртіла фрагментів бронзи (рис.2). Утворення такої трибоструктури з відносно невеликою твердістю (в продуктах зношування переважають відносно м'які оксиди міді), по-перше, запобігає схопленню, по-друге, знижує інтенсивність розвитку корозійно-втомного і абразивного зношування.

Для трибосистем, в яких продукти зношування не мають вільного виходу із зони контакту, в якості критерія оцінювання сумісності матеріалів фретинг – пари запропоновано параметр зміни об'єму матеріалу:

$$\Delta = \frac{KV^I}{V^{II}}, \quad (1)$$

де К-параметр, який враховує щільність упакування порошку продуктів зношування; V^{II} -об'єм продуктів зношування, що утворюється в зоні контакту; V^I -сумарний об'ємний знос матеріалів трибопари.

Враховуючи, що продуктами зношування при фретинг-корозії металічних сплавів, як правило, є оксиди основного металу, їх об'єм для кожного із елементів трибопари можна визначити за співвідношенням:

$$V_{Mi}^I = V_{Mi}^{II} \cdot \Pi, \quad (2)$$

де V_{Mi}^{II} - об'ємний знос і-го елемента трибопари; Π -коефіцієнт Піллінга-Бетворда, який характеризує відношення об'єму оксиду, утвореного при окисненні, до відповідного об'єму металу.

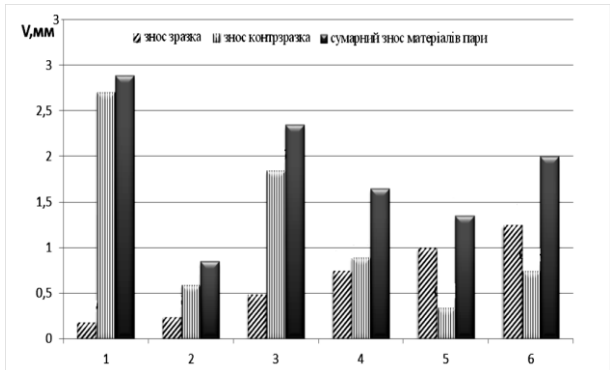


Рис.1 Діаграма величин об'ємного зносу зразків, контрзразків і сумарного зносу металів пар тертя при випробуванні на зношування в умовах фретинг-корозії. Пари тертя зразок –контрзразок: 1 – ВТ8 – МЛІ5; 2 – ВТ8 – БрАЖ9-4; 3 – ВТ8 – Д16Т; 4 – ВТ8 – ВТ8; 5 – ВТ8 – сталь Х18Н10Т; 6 – ВТ8 – сталь 45 загартована.

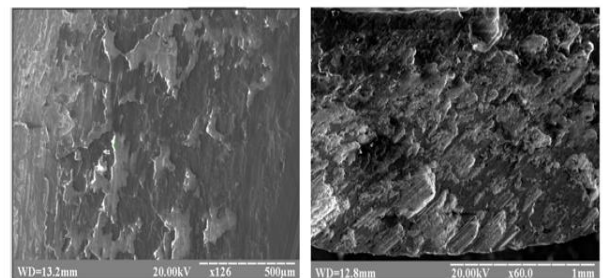


Рис. 2 Топографія поверхонь тертя зразка (а, сплав ВТ8) і контрзразка (б, бронза БрАЖ9-4) після випробувань на зношування в умовах фретинг-корозії.

Параметр Δ є характеристикою трибосистеми, яка визначає умову втрати працездатності спряження. При $\Delta > 1$ об'єм продуктів зношування, що утворюється в зоні контакту, перевищує сумарний об'ємний знос елементів трибопари. Такі трибосистеми характеризуються додатковим збільшенням тиску у спряженні та, як наслідок, втратою рухомості з'єднання та небезпекою виникнення передчасного втомного руйнування деталей. В табл. 1 подано розрахункові значення параметра Δ , визначені для різного поєднання матеріалів у фретинг-парі.

Таблиця 1

Вихідні дані для розрахунку та розрахункові значення параметра Δ досліджуваних пар тертя

№ п/п	Пари тертя	Матеріали пари тертя зразок/контрзразок	Об'ємний знос матеріалів пари тертя, V_{Mi}'' , мм ³	Оксидні фази продуктів зношування	Коефіцієнт Піллінга-Бедворда, П	Сумарний об'єм продуктів зношування матеріалів пари тертя, V^I , мм ³	Коефіцієнт зміни об'єму матеріалу в зоні трибоконтакта, Δ
1	BT8 – МЛ5	BT8	0,19	TiO ₂	1,76	2,52	0,57
		МЛ5	2,7	MgO	0,81		
2	BT8 – БрАЖ9-4	BT8	0,25	TiO ₂	1,76	1,48	1,15
		БрАЖ9-4	0,6	CuO	1,74		
3	BT8 – Д16Т	BT8	0,5	TiO ₂	1,76	3,25	0,91
		Д16Т	1,85	α -Al ₂ O ₃	1,28		
				γ -Al ₂ O ₃	1,45		
4	BT8 – BT8	BT8	0,75	TiO ₂	1,76	2,81	1,16
		BT8	0,85	TiO ₂	1,76		
5	BT8 – Х18Н10Т	BT8	1	TiO ₂	1,76	2,5	1,22
		Х18Н10Т	0,35	Fe ₃ O ₄ ,магнетит	2,10		
				Fe ₂ O ₃ , гематит	2,14		
				γ -Fe ₂ O ₃	2,45		
6	BT8 – Ст45 загартована	BT8	1,25	TiO ₂	1,76	3,77	1,25
		Сталь45	0,75	Fe ₃ O ₄ ,магнетит	2,10		
				Fe ₂ O ₃ , гематит	2,14		
				γ -Fe ₂ O ₃	2,45		

Для різного класу конструкційних сплавів визначено вплив параметрів фретингу на статистичні характеристики розсіювання величини фретинг-зносу. Встановлено, що незалежно від природи матеріалу, амплітудно – силового режиму фретингу і методу оцінювання зносу (ваговий, лінійний), розподіл випадкових похибок результатів спостережень підпорядковується закону нормального розподілу (рис.3). Механізм формування характеристик розсіювання величини фретинг – зносу (математичне очікування, середнє квадратичне відхилення, коефіцієнт варіації) визначається стохастичним характером розподілу напружень та стохастичним характером структурно-фазових перетворень матеріалу в зоні фрикційного контакту, а їх абсолютне значення зростає із підвищенням жорсткості амплітудно-силового режиму фретингу.

З метою встановлення взаємозв'язку геометричних параметрів трибоконтакту та інтенсивності зношування проводились дослідження залежності величини фретинг-зносу від параметра відносного зміщення поверхонь K_3 та геометричної

схеми контакту. Параметр K_3 визначається співвідношенням амплітуди фретингу до напівширини ділянки контакту в напрямку вібропереміщення $K_3 = A/L$. Важливість урахування зазначених чинників для трибосистем, що піддаються фретинг-корозійному зношуванню, обумовлена тим, що з їх зміною змінюються умови доступу до активованих тертям поверхонь зовнішнього середовища та умови виходу із зони контакту продуктів зношування.

Аналіз отриманих залежностей $H_{max} = f(K_3)$ (рис. 4) свідчить, що за умови постійної амплітуди фретингу величина зносу тим більша, чим ближче значення параметра K_3 наближається до 1. Одночасно збільшується дисперсія величини зносу. Інтенсивність зношування найбільш швидко зростає в області $K_3 \geq 0,5 \dots 0,6$. В цьому ж діапазоні значень параметра K_3 спостерігається різке зростання сили тертя.

Для різних геометричних схем контакту визначені амплітудні залежності величини фретинг-зносу. Встановлено, що місцеположення перехідної області від малих до високих значень інтенсивності зношування визначається впливом схеми контакту на умови формування фізичного контакту елементів трибопари і відповідає переходу від фрикційно-контактної взаємодії переважно через прошарок продуктів зношування до безпосередньої адгезійної взаємодії поверхонь.

Поєднання фретингу з дією нормальних до поверхні контакту динамічних навантажень, залежно від природи матеріалу, викликає різне за величиною додаткове підвищення зносу. Найбільше зростання величини зносу відбувається за умов контактної взаємодії в режимі ударного фретингу (рис. 5).

Механізм інтенсифікації зношування при поєднанні фретингу з ударною складовою полягає у пришвидченні процесів втомного руйнування поверхневих шарів металу як результат взаємодії хвиль деформації, що розповсюджуються в матеріалі від удару, з хвилями деформації від тангенціального відносного вібропереміщення.

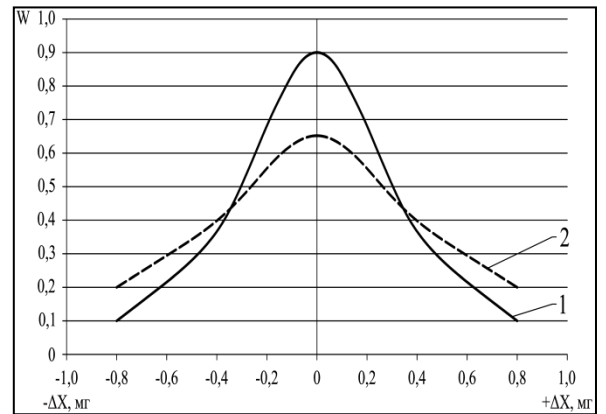


Рис.3 – Щільність розподілу випадкових похибок величини фретинг-зносу (W) сталі 45 (гартування+низький відпал): 1 – ваговий метод; 2 – лінійний метод.

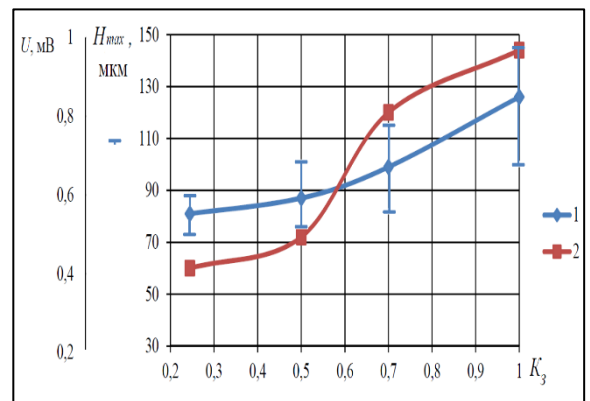


Рис.4 Залежність величини лінійного зносу H_{max} (1) і величини сигналу датчика сили тертя U (2) від параметра K_3

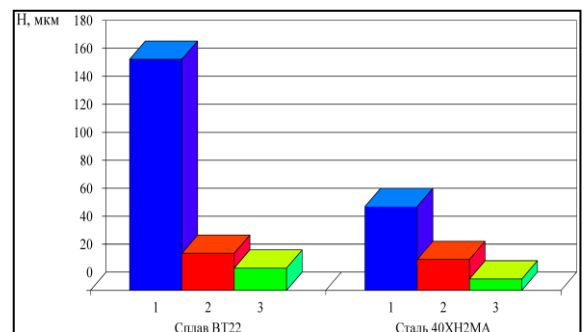


Рис. 5 Діаграма величин лінійного зносу зразків при випробуванні в умовах динамічного контактного навантаження. 1 – ударний фретинг; 2 – динамічний фретинг; 3 – удар з коченням;

На основі енергетичного аналізу трибопроцесу та структурно-реологічних механізмів дисипації підведеної до трибосистеми механічної енергії і релаксації напружень у фрикційному контакті, сформульовано загальні принципи створення поверхнево-модифікованих шарів і захисних покриттів підвищеної фретингостійкості (рис.6).



Рис. 6 Алгоритм створення поверхнево-модифікованих шарів і захисних покриттів підвищеної фретингостійкості

Четвертий розділ присвячено дослідженню впливу способу і технології формування дисипативних поверхнево-модифікованих шарів і захисних покриттів на процеси фрикційно-контактної взаємодії і зношування в трибосистемах за умов фретинг-корозії.

У підрозділі 4.1 подано результати досліджень впливу технологічних параметрів формування і параметрів фретингу на фрикційно-зносні характеристики трибосистем з дискретно-текстурованими мастилоємними поверхнями. Результати порівняльних тестових досліджень показали, що формування дискретно-текстурованих поверхонь з системою регулярно

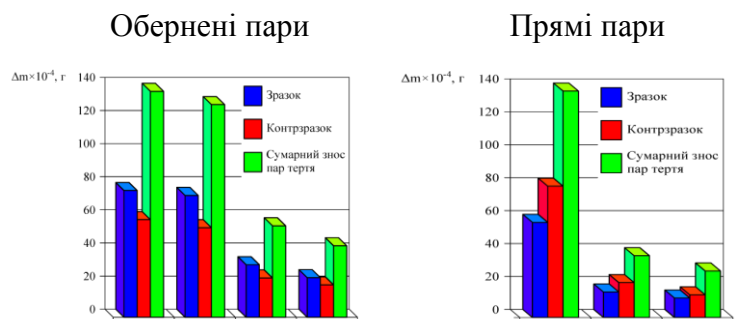


Рис. 7 Діаграма зносу пар тертя при випробуванні на зношування в умовах фретинг-корозії. Варіанти підготовки поверхонь зразків: 1-шліфування, без мащення; 2- шліфування, мащення ЦИАТИМ-201; 3- дискретно-текстурована поверхня № 1, мащення ЦИАТИМ -201; 4- дискретно-текстурована поверхня № 2, мащення ЦИАТИМ 201

розташованих мікрозаглиблень є ефективним способом підвищення ресурсу трибосистем, що працюють при граничному терті в умовах обмеженого мащення (рис. 7).

Схеми формування, відомості про матеріали досліджуваних пар тертя і технологічні параметри дискретно-текстурованих поверхонь, сформованих на досліджуваних зразках методом ударно-пластичного деформування, подані відповідно на рис. 8, табл. 2 і табл. 3.

Найбільший ефект з підвищення зносостійкості функціональних поверхонь фретинг-пари досягається за сферичного профілю мікрозаглиблень у прямих парах, де мікрозаглиблення формувались на поверхні з більшою твердістю, ніж твердість контртіла. При мащенні консистентним мастилом ЦІАТИМ-201 знос зразків із сферичним профілем мікрозаглиблень у прямих парах знизився, порівняно з базовим варіантом більш ніж у 6 разів, а сумарний знос пари – більш ніж у 5 разів.

Як видно із отриманих розрахункових залежностей (рис. 9), мікрозаглиблення із сферичним профілем характеризуються меншою швидкістю втрати об'єму із

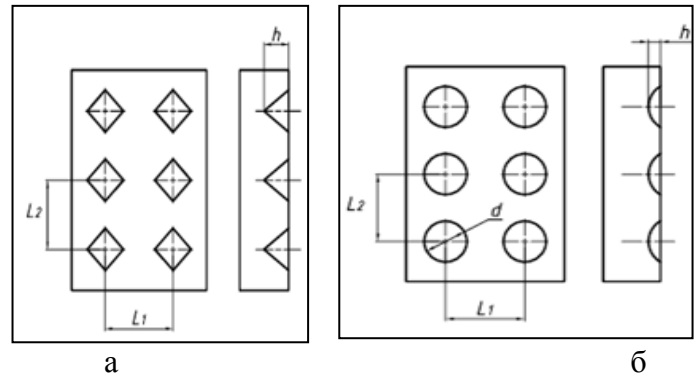


Рис. 8 Схеми формування дискретно-текстурованих мастилоємних поверхонь. Форма профілю мікрозаглиблень: а – призматична; б – сферична

Таблиця 2

Матеріали досліджуваних пар тертя

№ з/п	Пара тертя		Матеріал	Твердість, HRC
1.	Пряма	зразок	сталь 45, загартована	50...52
		контрзразок	сталь 45, нормалізована	20...22
2.	Обернена	зразок	сталь 30ХГСА, у стані постачання	18...20
		контрзразок	сталь 45, загартована	50...52

Таблиця 3

Технологічні параметри дискретно-текстурованих поверхонь досліджуваних пар тертя

Варіант поверхні	Профіль лунки	Відстань між лунками в ряду, L_1 , м	Відстань між рядами лунок L_2 , м	Глибина лунки h_L , м	Об'єм лунки V_L , мм ³
1.	Призматичний	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$0,15 \cdot 10^{-3}$	0,006
2.	Сферичний	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$0,08 \cdot 10^{-3}$	0,021

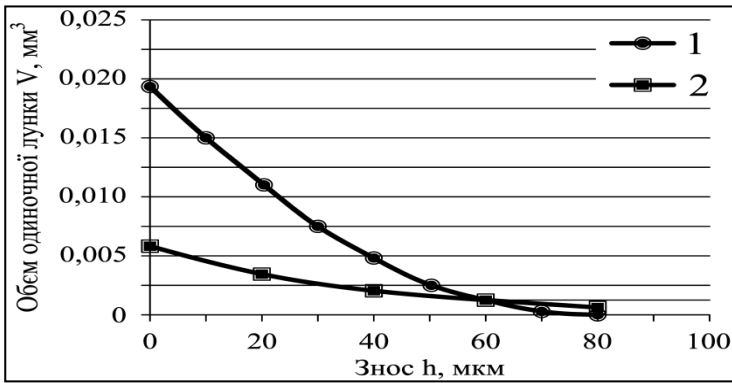


Рис.9 Розрахункові залежності зміни об'єму однієї лунки у прямих парах від величини лінійного зносу. Профіль лунки: 1 – сферичний; 2 – призматичний.

технологічних параметрів найбільш значущими за впливом на зносостійкість трибосистем з дискретно-текстурованою поверхнею є глибина мікрозаглиблень та щільність їх розтушування, яка характеризується ефектом парної взаємодії відстаней між мікрозаглибленнями L_1 і L_2 (рис.8). На основі аналізу перебігу процесів руйнування і регенерації граничних мастильних шарів, що відбуваються на ділянках контакту у міжлункованому просторі, розроблено модель розвитку зношування функціональних поверхонь трибосистем з дискретно-текстурованим мастилоємними поверхнями за умов фретинг-корозії.

У підрозділі 4.2 досліджено закономірності впливу структурно-фазового складу і технологічних схем формування на зносостійкість в умовах фретинг-корозії покриттів, отриманих методом електроіскрового легування (ЕІЛ). Досліджувались ЕІЛ-покриття, сформовані на титановому сплаві ВТЗ-1 за одношаровою, багатошаровою і комбінованою (ЕІЛ+лазерне оплавлення) технологічними схемами. В якості електродних матеріалів використовували композиційні керамічні матеріали на основі сполук перехідних металів, розроблені в Інституті проблем матеріалознавства НАН України:

- | | |
|--|--|
| 1. ЦБСАН (AlN-ZrB ₂) | 4. ЦЛАБ-3 (ZrB ₂ -ZrSi ₂ -SiC-AlN) |
| 2. ТАН (AlN-TiN) | 5. ЦЛАБ-2 (ZrB ₂ -ZrSi ₂ -LaB ₂) |
| 3. КХНТ-НХ (TiN+Cr ₂ C ₃)+(Ni-Cr) | |

Результати рентгенофазного аналізу показали, що у складі покриттів, сформованих методом ЕІЛ із електродних матеріалів зазначених систем, поряд з фазами вихідного матеріалу, виявляються фази продуктів їх взаємодії між собою та з киснем повітря, які утворюються при нагріві у плазмі електроіскрового розряду. В наслідок селективності змочування компонентів легуючого електрода матеріалом основи, формується структурно-неоднорідна глобулярна поверхня покриття, яка містить відносно рівномірно розташовані глобули кулькоподібної форми. Мікрорентгеноспектральним аналізом встановлено, що в системі ЕІЛ-покриття ЦЛАБ-2 – титановий сплав основною фазою глобул є диборид цирконію ZrB₂. Площа, яку займають глобули, складає 30%...50% від загальної площі поверхні покриття. Процес формування ЕІЛ-покриття за багатошаровою схемою полягає в пошаровому нанесенні твердої керамічної складової, перемежованої з шарами м'яких металевих фаз. Для формування твердої складової покриття використовували електродні матеріали ЦЛАБ-2 системи ZrB₂-ZrSi₂-LaB₂, для формування шарів

зростанням лінійного зносу. Методом багатофакторного планування експерименту отримано регресивні математичні моделі, що описують залежність величини зносу елементів трибопари та сумарного зносу пари тертя від технологічних параметрів дискретно-текстурованої поверхні та амплітудно-силових параметрів фретингу. Встановлено, що серед

металевих фаз – сплав на основі Ni системи Ni-Cr і сплав системи Fe-Ni-Cr-Mo-Mn-Si.

Експериментально встановлено, що за сукупністю триботехнічних показників (знос зразків, знос контрзразків, сумарний знос пари) найбільш ефективними електродними матеріалами для поверхневого зміцнення методом ЕІЛ титанових сплавів є композиційні керамічні матеріали на основі дибориду цирконію ZrB_2 . При фретинг-корозії в умовах тертя без мащення ЕІЛ-покриття із композиційної кераміки на основі ZrB_2 забезпечують підвищення зносостійкості сплаву ВТЗ-1, порівняно з ЕІЛ-покриттям на основі карбіду вольфраму ВКЗ, у 1,6...3 рази (рис. 10).

За рівнем зносостійкості і зношуючої здатності по відношенню до менш твердого контртіла (сталь 45 загартована) кращими показниками відрізняються багатошарове покриття, сформоване за схемою ЦЛАБ-2 (зовнішній шар)/ЦАБ-2 + (Ni-Cr) / сплав на

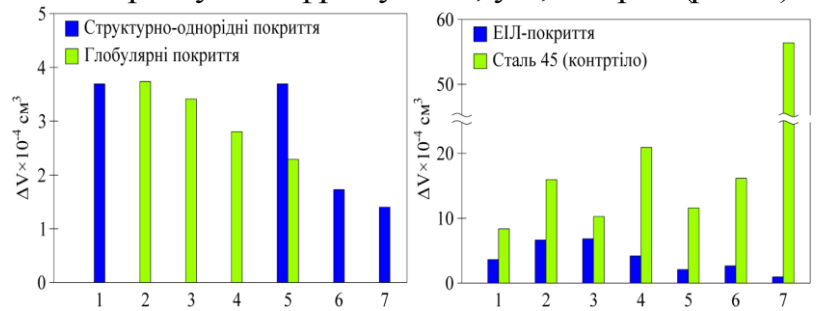


Рис. 10 Діаграма об'ємного зносу зразків при випробуванні на зношування в умовах фретинг-корозії.: а- в однойменних парах; б – в парі із сталлю 45 загартованою.

основі Fe / сплав ВТЗ-1 (основа). Зносостійкість багатошарового покриття на основі кераміки ЦЛАБ-2 в 1,7 рази вища, порівняно з одношаровим покриттям ЦЛАБ-2. Перемежування у структурі багатошарового покриття шарів твердої керамічної і м'якої металевої фаз, підвищує рівень його демпфуючої здатності. Внутрішній металевий шар сплаву Fe-Ni-Cr-Mn-Si, який прилягає до основи, має нульовий кут змочування по відношенню до титанового сплаву і близький з ним коефіцієнт термічного розширення, що забезпечує міцний адгезійний зв'язок в системі покриття-основа. Наявність Ni-Cr зв'язки в керамічному композиті підсилює когезійну міцність проміжних шарів. Очевидно, що поряд з високою твердістю і зносостійкістю зовнішнього робочого керамічного шару, така градієнтна структура сприяє деконцентрації напружень в покритті. Додатковий позитивний результат на зносостійкість дає лазерна обробка ZrB_2 – вмісних ЕІЛ-покриттів в режимі оплавлення. В результаті лазерного оплавлення зносостійкість одно- та багатошарового покриттів на основі кераміки ЦЛАБ-2 підвищилась відповідно в 2,5 і 3,2 рази.

Дослідженнями складу тонких поверхневих шарів методами рентгеноспектрального аналізу і Оже-спектроскопії встановлено, що висока зносостійкість ЕІЛ-покриттів на основі ZrB_2 , поряд з високою твердістю основної керамічної складової, зумовлена формуванням в зоні трибоконтакту нанорозмірного поліоксидного шару у складі твердої тугоплавкої оксидної матричної фази (ВТОМ) на основі оксидів Zr, La, Ti і легкоплавкої боросілікатної зв'язуючої фази $B_2O_3-SiO_2$. Високотверда тугоплавка оксидна матрична фаза такої трибоплівки відповідає за несучу здатність і зносостійкість модифікованої поверхні, а боросілікатна фаза, виконуючи роль твердого мастила, знижує фрикційне навантаження трибоконтакту.

У підрозділі 4.3 для різного типу функціональних покриттів, сформованих методами газотермічного напилювання (ГТН), визначено закономірності впливу

складу вихідного матеріалу і технології напилювання на зносостійкість за різних умов фрикційно-контактної взаємодії. Встановлено, що зносостійкість покриттів систем WC-Co, WC-Ni, напилених детонаційно-газовим методом, крім складу вихідного порошкового матеріалу, суттєво залежить від типу (будови) частинок порошку та теплоенергетичних параметрів горючої газовой-детонаційної суміші. Найбільш сприятлива з огляду деформаційно-міцнісних властивостей і зносостійкості структура покриття формується із порошкових матеріалів із гетерогенною композиційною будовою частинок порошку (плаковані та конгломеровані порошки) при використанні для напилення (пропан+бутан) – кисневої горючої детонаційно-газової суміші (табл. 4). За такої умови досягається

Таблиця 4

Результати порівняльного оцінювання триботехнічних властивостей в умовах фретинг – корозії детонаційних покриттів із композиційних порошкових матеріалів на основі карбиду вольфраму

№ з/п	Покриття	Вихідний склад порошкового матеріалу, % мас.	Тип порошку	Варіант газОВО-детонаційної суміші, що використовувалась для напилення	Параметр зносостійкості, I _h мкм/цикл	Коефіцієнт тертя, f
1	2	3	4	5	6	7
1	BK15	85WC; 15Co	Механічна суміш	Ацетилен-кисень	2,9·10 ⁻⁶	0,94
				Пропан+бутан-кисень	-	-
2	BH30	70WC; 30Ni	Механічна суміш	Ацетилен-кисень	11,6·10 ⁻⁶	0,79
				Пропан+бутан-кисень	-	-
3	BK15B	85WC; 15Co	Компактований	Ацетилен-кисень	2,5·10 ⁻⁶	0,86
				Пропан+бутан-кисень	1·10 ⁻⁶	1,15
4	BK25M	75WC; 25Co	Сфероїдизований	Ацетилен-кисень	-	-
				Пропан+бутан кисень	1,9·10 ⁻⁶	0,98
5	BH15П	85WC; 15Ni	Плакований	Ацетилен-кисень	-	-
				Пропан+бутан-кисень	8,6·10 ⁻⁶	0,96
6	Сплав BT8				65·10 ⁻⁶	0,25

найменша ступінь знеуглецювання карбідної складової і менш інтенсивне утворення у структурі покриття крихких інтерметалідних сполук. За результатами визначення залежності інтенсивності зношування від амплітуди вібропереміщень, питомого контактного навантаження та температури, на прикладі, покриття BK15B, встановлені гранично допустиме поєднання амплітудно-силових параметрів фретингу і гранична робоча температура. Показано, що в покриттях зазначених систем, з одного боку, внаслідок високого коефіцієнта тертя та відповідно високих локальних температур фрикційного нагріву, можуть виникати значні термічні напруження. З другого боку, наявність феромагнітної складової (Co; Ni), завдяки ефекту магнітно-пружного гістерезису, та наявність розвинутої мережі міжфазних границь забезпечують їм підвищену дисипативно-релаксаційну здатність.

В табл. 5 представлено результати порівняльних випробувань на зношування при фретинг-корозії ряду функціональних покриттів, отриманих плазово-дуговим, імпульсно-плазовим та високошвидкісним газополуменевим методами ГТН.

Випробування проводились в парі із загартованою сталлю 45 (HRC 50...52) при умовно «помірному» ($A=125$ мкм; $P=19,8$ МПа; $N=5 \cdot 10^5$ цикл) та умовно «жорсткому» ($P=250$ мкм; $P=29,4$ МПа; $N=2 \cdot 10^5$ цикл) амплітудно-силовому режимі фретингу.

Таблиця 5

Результати порівняльних випробувань на зношування в умовах фретинг-корозії покриттів, сформованих методами плазово-дугового, імпульсно – плазового і високошвидкісного газополуменевого наплення

№ пор	Покриття	Склад вихідного матеріалу	Метод наплення	Показник зносостійкості I_N , цикл/мкм за амплітудно-навантажувального режиму фретингу	
				Умовно «помірний»	Умовно «жорсткий»
1.	КХН-30	70 мас. % Cr_2C_3 + 30мас.% Ni	Плазово-дуговий	$3,6 \cdot 10^4$	$0,25 \cdot 10^4$
			Імпульсно-плазовий	$5,0 \cdot 10^4$	-
2.	КТН-35	65мас.% TiC+35мас.%Ni	Плазово-дуговий	$4,2 \cdot 10^4$	$0,31 \cdot 10^4$
3.	КТН-50	50мас.%TiC +50мас.% Ni	Плазово-дуговий	$4,9 \cdot 10^4$	$0,36 \cdot 10^4$
4.	ПС-12 НВК-01	65мас% сплаву Ni-Cr-B-Si-Fe+35мас.%WC	Плазово-дуговий	$4,8 \cdot 10^4$	$0,27 \cdot 10^4$
			Імпульсно-плазовий	$5,9 \cdot 10^4$	-
5.	Молібден	Мо-порошок	Плазово-дуговий	$5,2 \cdot 10^4$	$0,5 \cdot 10^4$
			HVAF-газополуменевий	$5,6 \cdot 10^4$	$0,91 \cdot 10^4$
6.	Сплав ВТЗ-1			$2,0 \cdot 10^4$	$0,22 \cdot 10^4$

Аналіз отриманих результатів показує, що незалежно від методу ГТН композиційні гетерогенні покриття (КХН-30, КТН-35, КТН-50, ПС-12НВК-01), які за «помірного» амплітудно-силового режиму фретингу виявляють високу зносостійкість, за «жорсткого» режиму проявляють меншу зносостійкість, ніж менш тверде Мо-покриття. На відміну від Мо-покриття, гетерогенні композиційні покриття, що містять високотверді карбідні фази (Cr_2C_3 ; TiC), характеризуються стрибкоподібним зростанням величини зносу при досягненні деякого критичного значення питомого контактного навантаження $P_{кр}$ (рис. 11, рис. 12), величина якого корелює з міжфазною когезійною

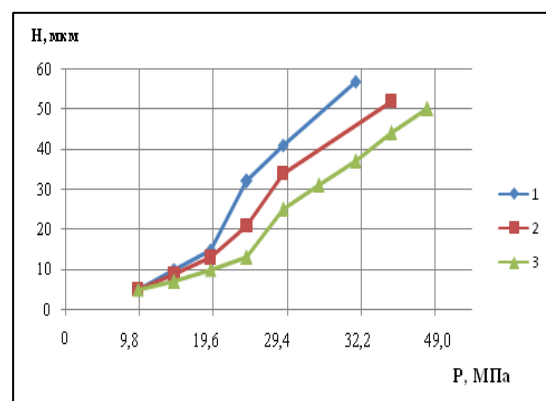


Рис. 11 Залежність величини зносу покриттів КХН-30 (1), КТН-35 (2) і КТН-50 (3) від контактного навантаження. Наплення плазово-дуговим методом. Умови випробувань: $A=125$ мкм; $v=30$ Гц; $T=293$ К; $N=5 \cdot 10^5$ цикл. Пари однойменні

міцністю покриття.

На основі результатів порівняльних випробувань на зношування в умовах граничного тертя при мащенні консистентним мастильним матеріалом «Ера» експериментально доведена ефективність застосування Мо-покриття, напilenного HVAF-методом і покриття, напilenого методом електродугової металізації із аустенітної сталі 40X13, як альтернативних електролітичному хромуванню.

Як видно із отриманих залежностей $H = f(P)$ (рис. 13), при максимально встановленій величині питомого контактного навантаження $P=49$ МПа, величина лінійного зносу Мо-покриття майже у 20 разів нижча ніж електролітичного Cr-покриття. В діапазоні питомих контактних навантажень $P \leq 29,4$ МПа стабільно більш високою зносостійкістю, порівняно з електролітичним хромом, має покриття 40X13. Ефективність мастильної дії у трибосистемах з ГТН Мо-покриттям і покриттям із мартенситної сталі 40X13 в умовах фретингу розглянуто з позицій впливу структурно-реологічних механізмів на здатність матеріалів покриття до формування стійких мастильних шарів.

Для трибосистем, у яких функції зовнішньої робочої поверхні виконує шар захисного зносостійкого покриття, проведено аналіз розподілу еквівалентних напружень (по Мізесу), що виникають у покритті і матеріалі основи від дії температур фрикційного нагріву. Задача вирішувалась для моделей з

твердосплавним покриттям ВК15 і чотирьох варіантів матеріала основи з різним комплексом механічних і теплофізичних властивостей. Фрикційний нагрів моделювався дією на зовнішню поверхню покриття рівномірно розподіленого по зовнішній поверхні покриття теплового потоку з температурою 323 К, 423 К, 573 К. Розрахунки виконувались для товщини покриття 0,1 мм, 0,3 мм, 0,5 мм та трьох різно розташованих в об'ємі циліндра елементів: на твірній циліндра, в середній частині циліндра і по осі циліндра (рис. 14). За результатами аналізу побудованих розрахункових залежностей розподілу напружень визначені закономірності формування напружено-деформованого стану системи покриття-основа під дією температур фрикційного нагріву. Встановлено, що незалежно від матеріалу основи та зміни у встановлених межах товщини покриття і температури нагріву поверхні,

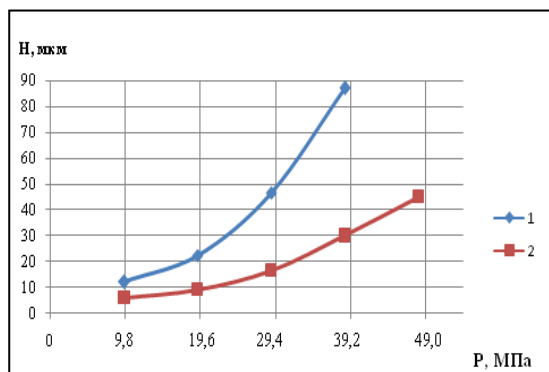


Рис. 12. Залежність зносу молибденового покриття від питомого контактного навантаження. Напilenня HVAF-методом. Умови випробувань: 1 - $A=250$ мкм; $P=19,6$ МПа; $N=2 \cdot 10^5$ цикл; 2 - $A=125$ мкм; $P=29,4$ МПа; $N=5 \cdot 10^5$ цикл. $v=30$ Гц; $T=293$ К. Матеріал контрзразка – Сталь 45 (HRC 50-52)

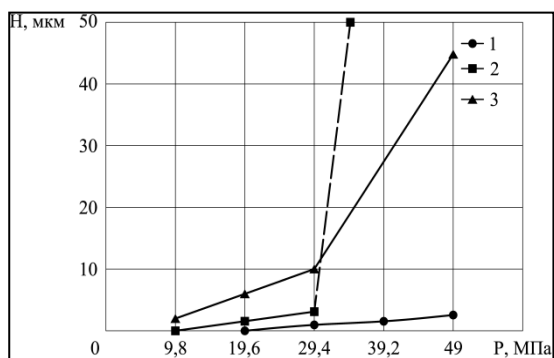


Рис. 13. Результати порівняльних випробувань на зношування покриттів при фретинг-корозії в умовах мащення: 1 – молибден, газополуменеве напilenня; 2 – 40X13, електродугова металізація; 3 – твердий електролітичний хром.. Матеріал контрзразка – сталь 45 (HRC=50-52). Мастильний матеріал «Ера».

як в покритті, так і в матеріалі основи утворюються напруження розтягу. Напруження, що виникають у покритті, суттєво залежать від матеріалу основи, збільшуються із збільшенням товщини покриття і температури нагріву та за абсолютним значенням досягають когезійної міцності покриття. Негативний вплив додаткових термічних напружень в покритті може бути мінімізований шляхом оптимізації співвідношення комплексу фізико-механічних і теплофізичних властивостей покриття і основи та заходів, що сприяють зниженню температури фрикційного нагріву.

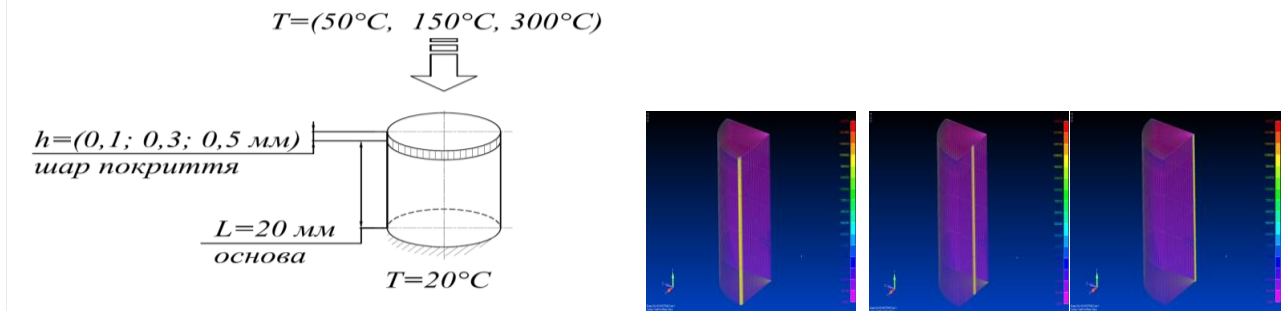


Рис. 14. Розрахункова схема (а) та скінчено-елементна модель трибосистеми (б).

П'ятий розділ присвячено дослідженням, спрямованим на розробку високотемпературних зносостійких матеріалів для трибоспрямижень деталей гарячої частини газотурбінних двигунів.

Для різного класу жароміцних сплавів виконано аналіз температурних залежностей параметрів фретинг-зносу. Встановлено, що незалежно від природи матеріалу основи і принципу, накладеного в основу забезпечення жароміцності сплаву, критична температура переходу від допустимого зношування до недопустимого глибинного руйнування матеріалів контактної пари відповідає діапазону температур падіння характеристик об'ємної міцності. Абсолютне значення критичної температури зміни параметрів фретинг-зносу не знаходиться у прямій залежності від температури плавлення матеріалу, а температурний діапазон максимуму зносостійкості лежить нижче температур, необхідних для утворення оксидних фаз за механізмом звичайного термохімічного окислення.

На основі аналізу перебігу трибологічних процесів в зоні фрикційного контакту за умов високотемпературного фретингу розроблено еволюційну модель трибосистеми, яка показує зміну стану поверхневих шарів матеріалу елементів трибопари і визначає умови переходу від їх нормального зношування до недопустимого патологічного руйнування. Еволюцію стану трибосистеми за умов високотемпературного фретингу представлено схемою, поданою на рис. 15.

Перші три стадії розвитку фретинг-процесу можна охарактеризувати як період формування рівноважної для даних умов фрикційно-контактної взаємодії морфології поверхні, складу захисних оксидних плівок та структури приповерхневого шару матеріалу. Цей процес необхідно розглядати як стохастичний кінетичний процес з різним рівнем трансформації структури в межах окремо взятих плям фактичного контакту. Площа, покрита оксидними плівками, їх товщина, склад і властивості, а також товщина і властивості трансформованих структурно-змінених приповерхневих об'ємів матеріалу визначаються як природою матеріалів контактної пари, так і температурно-силовими умовами фретингу.

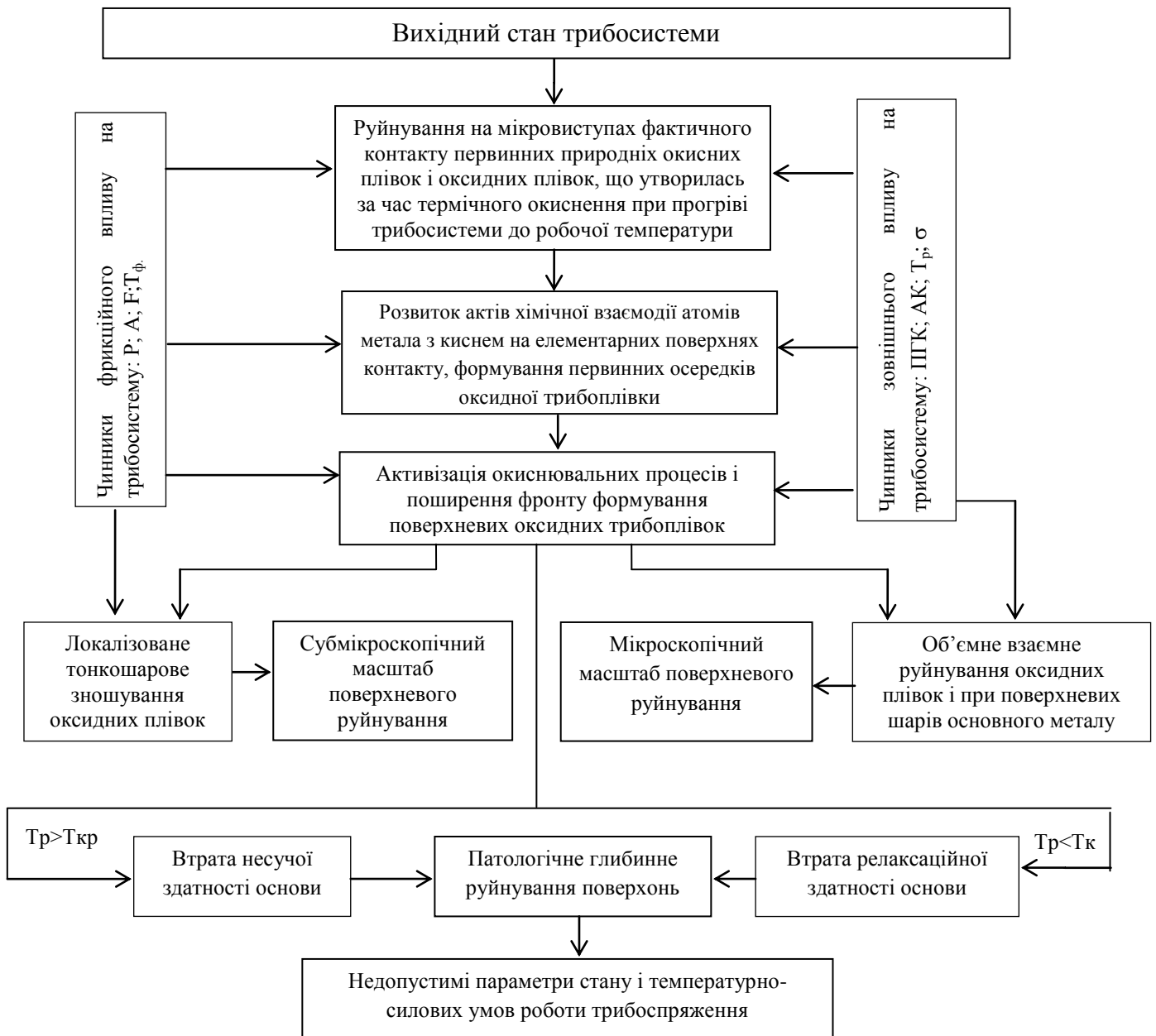


Рис. 15. Модель еволюції стану трибосистеми в умовах високотемпературного фретингу: ПГК – параметри геометрії контактних поверхонь; АК – активні компоненти атмосфери навколишнього середовища; T_r – робоча температура; σ – напруження від зовнішнього об'ємного навантаження; P – контактні навантаження; A – амплітуди ковзання; F – сила (коефіцієнт) тертя; T_f – температура фрикційного нагріву

Четверта стадія, залежно від характеру трансформації структури і зміни стану трибосистеми, є стадією нормального мікро- чи субмікроскопічного масштабу руйнування або стадією недопустимого патологічного руйнування. Першій умові відповідають такі параметри структури трибосистеми за яких, за прийнятих температурно-силових умов фретингу, існує динамічна рівновага між швидкістю руйнування і відновлення захистного шару окисних плівок. Якщо така умова порушується, наприклад, внаслідок втрати матеріалів основи несучої або релаксаційної здатності, розвиток фретинг-процесу відбувається за механізмом схоплення з утворенням глибинних локальних пошкоджень поверхонь трибоконтакту.

З урахуванням встановлених закономірностей еволюції стану трибосистеми і умов мінімізації зношування сформульовані принципи забезпечення зносостійкості матеріалів в умовах високотемпературного фретингу. Теоретично обґрунтовано перспективність застосування в якості високотемпературних зносостійких матеріалів з робочою температурою до 1323 К евтектичних сплавів системи

Co (Cr; Al; Fe)- TiC та порошкових матрично-наповнених спечених псевдосплавів систем Co (Cr; Al; Fe)- TiC, Ni (Cr; Al; Fe)- TiC (в подальшому-сплави).

З метою прогнозування процесів формування захисних оксидних плівок, як одого із найбільш важливих факторів, що відповідає за високотемпературну зносостійкість металів, та прогнозування процесів твердофазної взаємодії між компонентами, проведено термодинамічний аналіз реакцій взаємодії елементів досліджуваних систем з киснем повітря і між собою. Термодинамічні розрахунки виконувались з використанням комп'ютерної програми "АСТРА" для суміші індивідуальних речовин, що входять до сплавів Co (Cr; Al; Fe)- TiC, Ni (Cr; Al; Fe)- TiC за фіксованих зовнішніх умов (температури, тиску, співвідношення масових частот компонентів суміші до повітря). За результатами термодинамічного аналізу визначено найбільш сприятливі концентраційні співвідношення компонентів композиції. Склад досліджуваних композиційних матеріалів подано в табл. 6.

Таблиця 6

Склад досліджуваних композиційних матеріалів

№ пор	Марка матеріалу	Склад компонентів, % об.				Тип матеріалу
		Co, легов.	Ni, легов.	NbC	TiC	
1.	ХТН-Л	81,0	-	19,0	-	евтектичний, системи Co(Cr; Al; Fe)- NbC
2.	ЕК-30	70,0	-	-	30,0	евтектичний, системи Co(Cr; Al; Fe)- TiC
3.	ПК-30	70,0	-	-	30,0	порошковий, системи Co(Cr; Al; Fe)- TiC
4.	ПК-40	60,0	-	-	40,0	-
5.	ПК-50	50,0	-	-	50,0	-
6.	ПК-60	40,0	-	-	60,0	-
7.	ПН-30	-	70,0	-	30,0	порошковий, системи Ni(Cr; Al; Fe)-TiC
8.	ПН-40	-	60,0	-	40,0	-
9.	ПН-50	-	50,0	-	50,0	-
10.	ПН-60	-	40,0	-	60,0	-
11.	ЖС32-30				30,0	порошковий дисперсно-твердіючий Ni-сплав ЖС32-TiC
12.	ЖС32-40				40,0	-
13.	ЖС32-50				50,0	-

* Матрична фаза сплавів № 2 - № 10 містить 20% мас Cr, 3% мас Al і 3% мас Fe.

Дослідженнями з визначення впливу пористості на зносостійкість спечених порошкових матрично-наповнених сплавів встановлено, що у високопористого матеріалу, з пористістю вище 10%, приріст інтенсивності зношування на одиницю приросту пористості на порядок вищий, ніж у низькопористого (рис.16).

Показано, що пори і місця скупчення кристалів карбідної фази, де фіксується найбільша концентрація пор, можна розглядати як дефекти структури з пониженою міцністю. Аналіз концентраційних залежностей інтенсивності зношування (рис.17) дозволив встановити, що найбільш висока зносостійкість порошкових матрично-наповнених сплавів досягається за вмісту карбідної TiC-фази, близькій до 50% об.

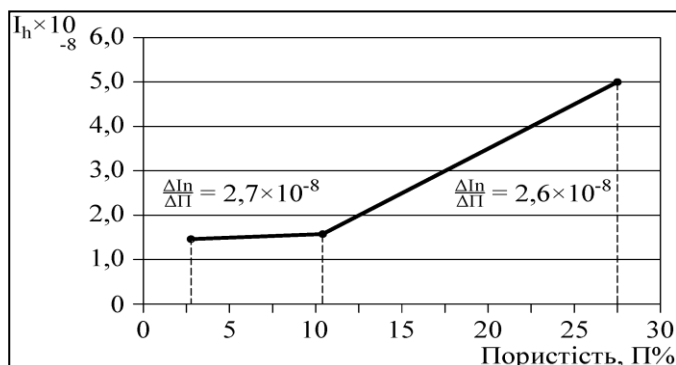


Рис. 16. – Залежність інтенсивності фретинг-корозійного зношування композиційного порошкового сплаву ПК-50 від пористості.

$T=293\text{K}$, $N=2 \cdot 10^6$ цикл.

Пари одноіменні.

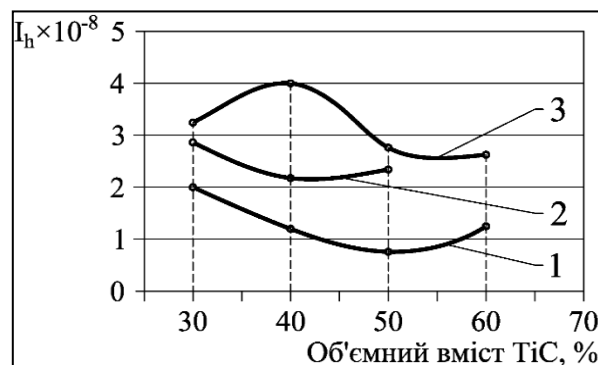


Рис. 17 – Залежність інтенсивності зношування композиційних порошкових сплавів від об'ємного вмісту TiC: 1- сплави системи Ni(Cr; Al; Fe)-TiC; 2 – сплави системи ЖС32-TiC; 3 – сплави системи Co(Cr; Al; Fe)-TiC. $T=293\text{K}$; $N=1 \cdot 10^6$ цикл.

Пари одноіменні.

Цій же області відповідає мінімальна величина коефіцієнтів концентрації напружень, що виникають в поверхневому шарі композиту від дії сили нормального тиску K_r і сили тертя (рис.18).

Результати випробувань на зношування показали, що порошкові сплави з оптимальним вмістом карбідної TiC-фази відповідають умові найбільш високої зносостійкості (рис. 19, рис. 20). В діапазоні температур 923K...1123 K порошкових сплавів ПН-50 з матричною фазою на основі Ni має в 1,5...2 рази нижчу зносостійкість ніж сплав ПК-50 з матричною фазою на основі Co. При подальшому збільшенні температури знос сплаву ПК-30 зростає більш інтенсивно, ніж сплаву ПН-30. В діапазоні температур 1123K...1323 K серед досліджуваних порошкових сплавів найбільшою зносостійкістю відрізняються сплави з матричною фазою на основі Ni ПН-50 і ЖС32-50 (рис.20).

Дослідження стану топографії і мікроструктурний аналіз порошкових матрично-наповнених сплавів показали, що в умовах високотемпературного фретингу при температурах $T \geq 1323\text{ K}$ мікрорельєф поверхні і структура приповерхневого шару сплавів ПК-50, ПН-50, ЖС32-50 не містять помітних ознак прояву в зоні трибоконтакту пластичного деформування та руйнування від

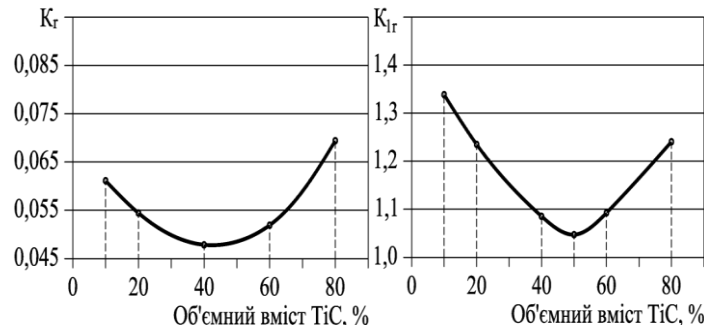


Рис. 18 – Розрахункові значення максимальних коефіцієнтів концентрації напружень поздовжнього стиснення (K_r) і поздовжнього зсуву (K_{tr}) в модельному композиті Co-TiC залежно від об'ємного вмісту включень TiC.

схоплення, що забезпечує умови для формування на поверхні трибоконтакту стійкого захисного шару оксидних фаз.

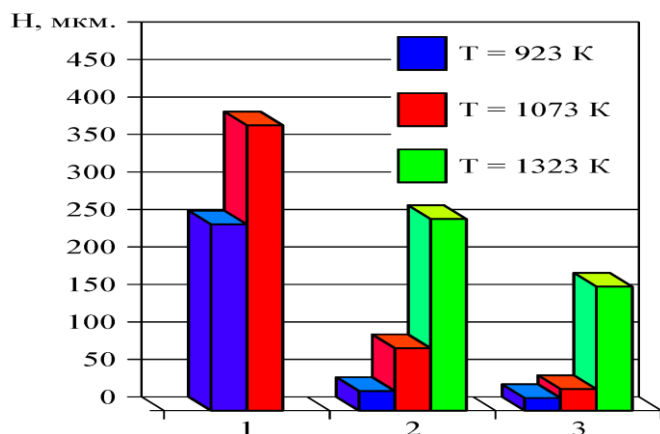


Рис. 19 – Діаграма середнього лінійного зносу сплавів ХТН-Л (1), ЕК-30 (2) та ПК-50(3) при випробуванні на зношування в умовах високотемпературного фретингу. Умови випробувань: $A = 120$ мкм; $P = 30$ МПа; $N = 5 \cdot 10^6$ цикл; $v = 30$ Гц. Пари однойменні

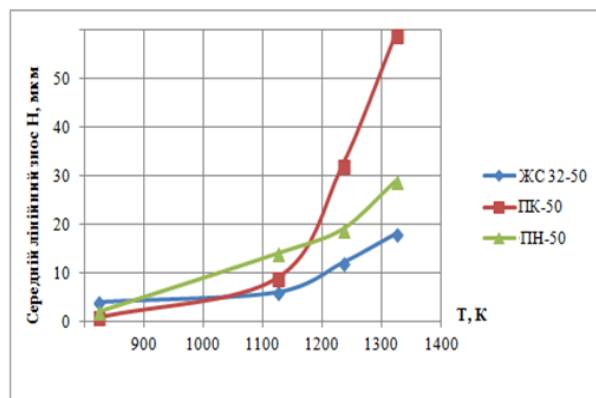
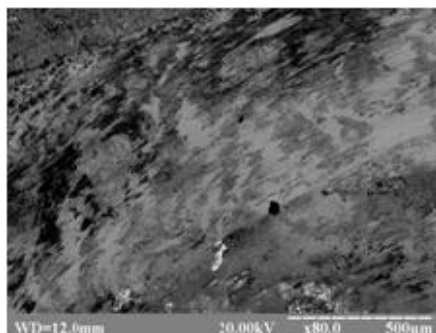


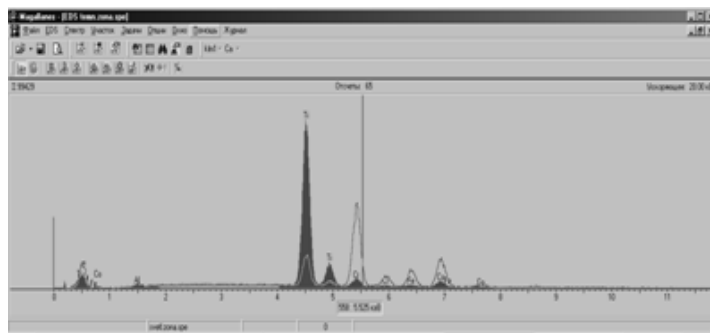
Рис. 20.- Графіки залежності середнього лінійного зносу сплавів ПК-50, ПН-50 і ЖС 32-50 від температури. Умови випробувань: $A=120$ мкм; $P= 30$ МПа; $v= 30$ Гц; $N=1 \cdot 10^6$ цикл. Пари одноіменні

На рис. 21 показано електронно-мікроскопічне зображення поверхні (а) та концентраційні спектри елементів (б) на поверхні тертя сплаву ПК-50 після випробувань на зношування в умовах високотемпературного фретингу при $T = 1323$ К.

Із аналізу морфології і концентраційних спектрів хімічних елементів можна зробити висновок, що оксидні плівки складаються із оксидів матричної фази (переважно оксиду хрому Cr_2O_3 – світлі ділянки на рис. 21а). Їх поверхня частково покрита оксидом титану TiO_2 (темні ділянки на рис. 21а).



а



б

Рис. 21 – Зображення поверхні (а) та розподіл елементів (б) на поверхні доріжки тертя сплаву ПК-50 після випробувань на зношування при $T = 1323$ К. Умови випробувань: $A = 120$ мкм; $P = 30$ МПа; $v=30$ Гц; $N = 5 \cdot 10^6$ цикл. Пари однойменні.

Відомо, що за великого вмісту хрому при високотемпературному окисленні сплавів на основі Ni також можуть формуватись суцільні оксидні шари Cr_2O_3 та утворюватись оксидні плівки шпінельного типу $NiO \cdot Cr_2O_3$. Формування таких градієнтних трибоплівок із зовнішнім шаром оксиду титану, розташованому на більш твердому підшарку оксидів матричної фази, із позитивним градієнтом механічних властивостей забезпечує зниження фрикційної навантаженості

контактних поверхонь. За таких умов, більш високу зносостійкість сплаву ПН-5 при температурах 122К...1323К, порівняно із сплавом ПК-50, можна пояснити більшою адгезією оксидних плівок з основою і більшою жорсткістю сплавів системи Ni-Cr, ніж адгезія оксидних плівок до основи і жаростійкість сплавів системи Co-Cr. Висока зносостійкість сплаву ЖС32-50 пояснюється його високою жароміцністю за рахунок механізму подвійного зміцнення – карбідним, за рахунок зміцнення композиту включеннями карбіду TiC, і дисперсійним зміцненням матричної фази γ' – фазою.

У шостому розділі подано результати з розробки аналітично-розрахункового методу оцінювання фретингостійкості поверхневих шарів та технологічних заходів, спрямованих на підвищення довговічності деталей авіаційних трибомеханічних систем.

В основу розробки аналітично-розрахункового методу оцінювання фретингостійкості поверхневих шарів покладено розв'язування зносоконтактної задачі, яка ґрунтується на енергетичній моделі трибопроцесу, законах термодинаміки відкритих нерівноважних систем та енергетичній концепції міцності твердих кристалічних тіл.

В трибосистемах акт руйнування локалізується в малому об'ємі приповерхневої області, який при досягненні критичних напружень відокремлюється у вигляді частки зносу. Акт руйнування відбувається за умови виникнення в об'ємі фрагменту, який відокремлюється, нерівності:

$$U_{def} \geq U_s, \quad (3)$$

де U_{def} – надлишкова внутрішня енергія, накопичена внаслідок деформацій в об'ємі відокремлюваного фрагменту в наслідок деформації, U_s – енергія активації руйнування фрагменту даного об'єму.

Якщо прийняти, що об'єм частини зносу обмежено напівсферою з радіусом $d/2$ (d – діаметр плями контакту), то умова утворення одиничної частинки зносу буде визначатися співвідношеннями:

$$U_{def} = \frac{\pi d^3}{12} \left(\frac{\sigma_{max}^2}{2E} + \sigma_{max} \bar{\varepsilon} t \right) \geq U_s, \quad (4)$$

$$U_s = U_a - \nu [TR \ln\left(\frac{t}{\tau_0}\right) + \Delta u_n + \Delta g] \quad (5)$$

де $\sigma_{max} = E \cdot \varepsilon_{max}$ – максимальне значення напруження, E – модуль пружності матеріала, $\bar{\varepsilon}$ – середня швидкість непружних деформацій, t – час перебування системи у навантаженому стані, T – температура, ν – кількість молів речовини в об'ємі відокремлюваного фрагменту, R – універсальна газова стала, τ_0 – період теплових коливань атомів; Δu_n і Δg – приріст внутрішньої енергії одного поля речовини відповідно у результаті технологічних впливів та внаслідок фізико-хімічної взаємодії з навколишнім середовищем; $U_a = 2\gamma\pi d^2$ – енергія активації руйнування матеріалу, яка визначається когезійними властивостями речовини (γ – питома енергія когезії).

Припускаючи, що при фрикційному навантаженні приріст внутрішньої енергії матеріалу відбувається переважно за рахунок деформаційної складової, а у фрикційній взаємодії одночасно знаходиться n_r – число рівнозначних елементів і в тілах тертя трансформується однакова частка від підведеної механічної енергії із загального балансу енергії трибосистем, можна записати:

$$U_{def} \cdot n_r = \frac{\bar{W}(1 - \frac{\theta}{\bar{W}})}{2} = \frac{A_{TP}(1 - K)}{2}, \quad (6)$$

В умовах фретингу з повним проковзуванням енергетичними втратами на частині цикла попереднього зміщення можна знехтувати. Тоді сумарна витрачена на тертя зовнішня механічна енергія складає:

$$\bar{W} = A_{TP} = 2A \cdot P \cdot \mu \cdot N, \quad (7)$$

де A_{TP} – робота сили тертя, тотожна дисипованій механічній енергії, A – повна амплітуда проковзування, μ – коефіцієнт тертя трибопарі, N – кількість циклів фретингу.

Нехтуючи другим додатком співвідношення (5) умову руйнування (3) можна подати:

$$\frac{A_{TP}(1 - K)}{2n_r} \approx 2\gamma\pi d^2. \quad (8)$$

Звідси, з урахуванням (7) отримуємо оцінку кількості циклів фретингу до руйнування.

$$N_{\phi}^P \approx \frac{4\gamma S_{\phi}}{AP\mu(1 - K)}, \quad (9)$$

де $S_{\phi} = \frac{\pi d^2}{4} \cdot n_r$ – площа фактичного контакту.

Аналіз співвідношення (9) показує, що, за інших однакових умов, руйнування поверхні буде досягатись тим швидше (за меншої кількості циклів фретингу), чим менша когезійна міцність матеріалу, менша площа фактичного контакту, більший коефіцієнт тертя у трибопарі та менша здатність матеріалу розсіювати підведену механічну енергію.

У даному розділі представлено також результати досліджень, які дозволили розробити та запропонувати для практичного використання ряд технологічних заходів щодо підвищення зносостійкості і відновлення при ремонті деталей авіаційних трибомеханічних систем.

Для реалізації потенційно високої міцності і зносостійкості ГТН-покриттів із евтектичних сплавів на основі Fe з тугоплавкими сполуками втілення, розроблено спосіб поверхневого модифікування дискретною ЛО в режимі термоциклювання (ТЦО) і режимі оплавлення. Встановлено, що за оптимального співвідношення площ ЛО-модифікованої і вихідної поверхонь зносостійкість покриттів, підданих ЛО в режимі ТЦО і режимі оплавлення зростає відповідно у 1,85 і 2 рази. Позитивний

ефект дискретної ЛО в режимі оплавлення досягається завдяки формуванню диференційованої градієнтної структури: перекристалізованих оплавлених ділянок із стовбчастою дендритною структурою, близькою до структури литого евтектичного сплаву, ділянок із вихідною структурою покриття і перехідної зони термічного впливу.

Розроблено спосіб отримання комбінованих зносо- та антифрикційних покриттів, який включає попереднє нанесення ГТН-покриття з дискретно-фрагментованим шаром з наступною його інфільтрацією суспензією порошків фторопласта і графіту. Конструктивна схема комбінованого покриття зображена на рис. 22.

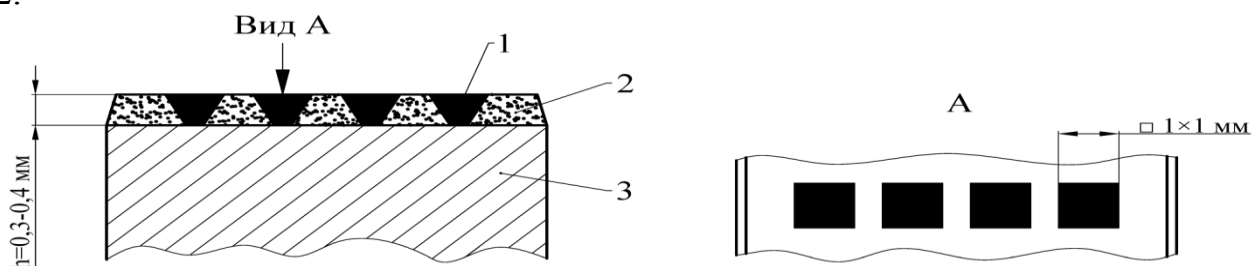


Рис. 22 Конструктивна схема покриття, сформована комбінованим методом: 1 – дискретно-фрагментований шар покриття; 2 – фторопластово-графітовий заповнювач; 3 – матеріал основи.

За результатами порівняльних випробувань зносостійкість плазменно-напилених ВКНА і БрА-7 комбінованих покриттів порівняно із покриттями, напиленими суцільним шаром, збільшилась відповідно у 8 і 6 разів (рис. 23). Одночасно, комбіновані покриття з дискретно-фрагментованою структурою забезпечують у 3 – 4 рази зниження коефіцієнту тертя та більш ніж на порядок знос контртіла у фретинг-парі із загартованою сталлю 45.

Експериментально доведено, що в умовах високих контактних навантажень, ефективним способом підвищення поверхневої міцності і стійкості до фретинг-корозійного зношування азотованих шарів на сталі є їх дискретна ЛО в режимі поверхневого гартування. За такого способу модифікування зносостійкість азотованої сталі 30Х2НВФА при терті без мащення зросла у 2 рази, а з мащенням консистентним мастилом «Ера» - у 5 разів, по відношенню до азотування за стандартною технологією.

Металографічним аналізом встановлено, що поверхнево-модифікований шар, який формується в результаті лазерного гартування попередньо азотованої сталі, складається із двох шарів (рис. 24): зовнішнього твердого нітридного шару і нижнього з армованою стовбчастими включеннями нітридної фази відносно м'якою

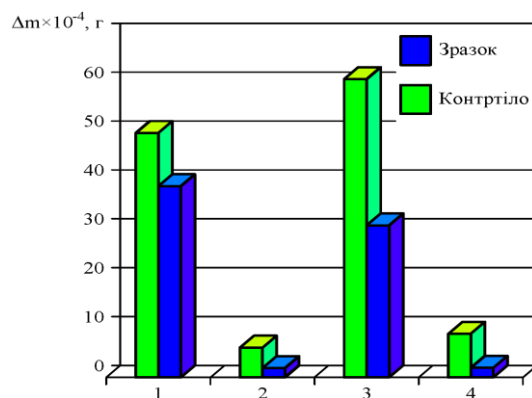


Рис. 23 Діаграма зносу зразків з покриттями і контртіл при випробуванні на зношування в умовах фретинг-корозії: 1; 3 – суцільне покриття; 2; 4 – дискретно-фрагментоване покриття з фторопластово-графітовим заповнювачем. Плазмово-дугове напилення сплавом ВКНА(1; 2) і бронзою БрА-7 (3;4). Контртіло - сталь 45 загартована

сталевою матрицею. Очевидно, що така структура здатна забезпечити більш високу контактну міцність і зносостійкість.

За результатами рейтингових досліджень встановлено, що для запобігання інтенсивному зношуванню високоміцного титанового сплаву BT22 у фретинг-парі із алюмінієвим сплавом Д16Т ефективним технологічним методом модифікування поверхні титанового сплаву є термодифузійне оксинітрування з наступним нанесенням на поверхню шару твердомастильного матеріалу типу ВАП. За такого способу оброблення зносостійкість титанового сплаву порівняно із вихідним станом підвищилась у 2 – 3 рази.

Одночасно зменшується адгезійна складова руйнування алюмінієвого сплаву, а поєднання термодифузійного насичення в єдиному технологічному циклі із старінням забезпечує сплав BT22 необхідний регламентований рівень міцності.

На основі аналізу механізмів впливу ГТН-покриттів на втомну міцність матеріалу основи теоретично і експериментально обґрунтовано технологічні заходи з підвищення втомно-циклічної міцності деталей з ГТН-покриттям. Розроблено технологічні рекомендації з відновлення зношених деталей із титанових сплавів. Експериментально доведено, що за підвищених величин зносу, коли відновлення деталі потребує нарощування товщини компенсуючого шару, що перевищує можливості методів ГТН, ефективним методом відновлення є напаявання композиційним матеріалом у складі високотемпературного припою на основі титану ВПР16 і карбиду вольфраму WC при їх оптимальному співвідношенні.

У додатках подано акти реалізації та впровадження результатів досліджень.

ВИСНОВКИ

На основі виконаних досліджень зроблені наступні висновки з наукових та практичних результатів роботи.

1. За результатами аналізу експлуатаційних дефектів деталей АТ отримані кількісні показники, які характеризують причини втрати їх працездатності. Встановлено, що найбільший відсоток дефектів деталей трибомеханічних систем виникає в номінально нерухомих і малорухомих вузлах і з'єднаннях за умов фрикційно-контактної взаємодії, що викликає розвиток фретинг-корозії. В середньому, для різних типів АТ відсоток деталей, що пошкоджується фретинг-корозією, складає від 65% до 87%. На підставі отриманих кількісних показників

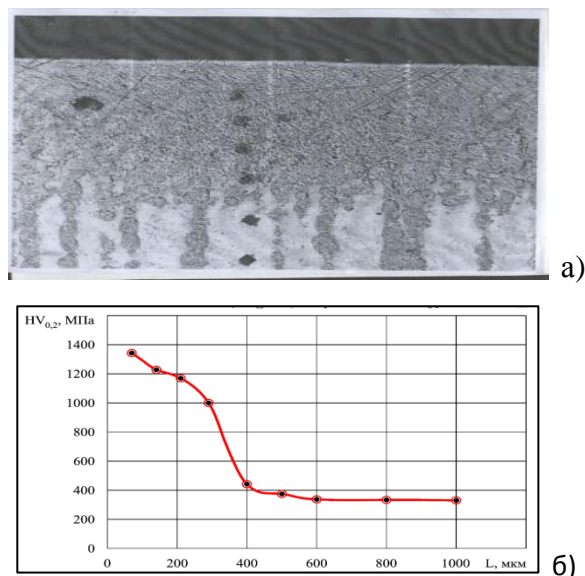


Рис. 24. Мікроструктура поверхневого шару (а) і розподіл мікротвердості (б) в поверхневому шарі сталі 30X2HBF після комбінованої обробки азотування + імпульсна лазерна обробка

пошкоджуваності деталей АТ фретинг-корозією та аналізу стану конструктивно-технологічного забезпечення їх зносостійкості сформульовані актуальність теми та визначені завдання дослідження.

2. На прикладі поєднання у фретинг-парі титанового сплаву ВТ8 із конструкційними сплавами на основі Al, Cu, Mg, Fe та з одноіменним сплавом встановлено закономірності взаємного впливу природи матеріалів контактної пари на формування трибоструктури поверхні контакту та фрикційно-зносні характеристики трибосистем. З урахуванням специфіки впливу фретинг-корозії на втрату працездатності деталей і спряжень сформульовано принципи вибору сприятливого поєднання матеріалів фретинг-пари. Для трибосистем, втрата працездатності яких пов'язана з накопичуванням і розклинюючою дією в зоні трибоконтакту продуктів зношування, запропоновано критерій та розрахунково-аналітичний метод оцінювання фретинг-корозійної сумісності матеріалів. Запропонований критерій є характеристикою трибостистеми, яка показує у скільки разів об'єм ущільнених порошкових продуктів зношування, що утворюються при фретинг-корозії, більший або менший сумарного об'ємного зносу елементів трибопари.

3. Для різного класу конструкційних сплавів визначено закономірності впливу параметрів віброконтактного навантаження на статистичні характеристики величини фретинг-зносу. Встановлено, що незалежно від природи матеріалу і амплітудно-силових параметрів фретингу, розподіл випадкових похибок величини фретинг-зносу підпорядковується закону нормального розподілу. Статистичні показники розсіювання величини фретинг-зносу залежать як від природи і фізико-механічних властивостей матеріалу, так і від амплітудно-силових параметрів фретингу і зростають із збільшенням жорсткості амплітудно-силового режиму фретингу. Показано, що поєднання навантажень від динамічної складової і фретингу в режимі удару з проковзуванням найбільш суттєво пришвидшує процес зношування. Так, в режимі ударного фретингу величина зносу для сталі 40Х2НМА і титанового сплаву ВТ22 порівняно з фретингом без удару зростає відповідно у 2,7 та 6 разів. Механізм інтенсифікації зношування при фретингу з ударною складовою полягає у пришвидшенні процесів втомного руйнування поверхневих шарів металу при поєднанні хвиль деформації, що розповсюджуються від удару, з хвилями деформації від тангенціальної віброконтактної взаємодії поверхонь.

4. Визначено взаємозв'язок інтенсивності зношування матеріалів від геометричних розмірів та схеми контакту елементів трибопари. Встановлено, що за умови постійної амплітуди фретингу інтенсивність зношування зростає із збільшенням параметру K_3 , який характеризує відношення амплітуди фретингу до напівдовжини ділянки контакту у напрямку вібропереміщення. Найбільш швидке зростання інтенсивності зношування досягається, коли параметр відносного зміщення поверхонь перевищує деяке порогове значення, яке лежить в області $K_3 \geq 0,5 \dots 0,6$. Механізм інтенсифікації зношування при досягненні критичного значення параметра K_3 та критичної амплітуди фретингу пов'язаний із переходом від умов фрикційно-контактної взаємодії елементів трибопари переважно через прошарок продуктів зношування до безпосередньої адгезійної взаємодії поверхонь.

5. На основі енергетичної моделі трибопроцесів та аналізу структурно-реологічних механізмів дисипації енергії і релаксації напружень у фрикційному контакті розроблено концепцію керування фретингостійкістю елементів трибомеханічних систем. Показано, що в умовах динамічного контактного навантаження структурно-реологічні механізми, з одного боку, контролюють рівень нагромадженої внутрішньої енергії поверхневих шарів матеріалу, з другого, відповідають за формування напружено-деформованого стану поверхневих об'ємів матеріалу та кінетику утворення і руйнування захисних вторинних структур в зоні фрикційного контакту. З урахуванням специфіки фретинг-корозійного зношування сформульовані загальні принципи створення поверхнево-модифікованих шарів і захисних покриттів підвищеної фретингостійкості.

6. Визначено закономірності впливу технологічних параметрів формування і параметрів фретингу на фрикційно-зносні характеристики трибосистем з дискретно-текстурованими мастилоємними поверхнями. Експериментально доведено, що формування поверхонь з розвинутою системою мікрозаглиблень сприяє регенерації граничних мастильних шарів та є ефективним способом підвищення зносостійкості і ресурсу трибосистем, що працюють в умовах фретинг-контактної взаємодії з обмеженою подачею в зону трибоконтакту мастильного матеріалу. Найбільший ефект з підвищення зносостійкості досягається за сферичного профілю мікрозаглиблень у прямих парах, де мікрозаглиблення формувались на поверхні з більшою твердістю, ніж твердість контртіла. За такої умови і мащенні консистентним мастилом ЦИАТИМ-201 знос зразків у парі сталь 45 загартована – сталь 45 нормалізована знизився у 6 разів, а сумарний знос елементів трибопари у 5,5 раза.

7. Для конструкційних титанових сплавів обґрунтовано вибір електродних матеріалів і технологічних схем формування поверхнево-модифікованих шарів методом ЕІЛ. Експериментально доведено, що висока стійкість до зношування ЕІЛ –покриттів із композиційної кераміки на основі ZrB_2 зумовлена, з одного боку, високою твердістю основної керамічної фази, з другого, формуванням в зоні трибоконтакту нанорозмірного поліоксидного шару у складі твердої тугоплавкої оксидної матриці на основі оксидів Zr і Ti і легкоплавкої склоподібної боросилікатної зв'язуючої фази $B_2O_3 + SiO_2$. Високотверда тугоплавка матрична фаза відповідає за міцність і несучу здатність трибоплівки, а боросилікатна фаза виконує функції твердомастильної антифрикційної складової.

8. Визначено закономірності впливу складу вихідного матеріалу, технологічних параметрів формування та параметрів фретингу на кількісні показники зносостійкості детонаційних покриттів систем WC-Co, WC-Ni. Встановлено, що найбільш сприятлива з огляду деформаційно-міцнісних властивостей і зносостійкості структура покриття формується із порошкових матеріалів з гетерогенною композиційною будовою частинок (плаковані та конгломеровані порошки) при напilenні (пропан+бутан) – кисневою горючою детонаційно-газовою сумішшю з меншою теплореакційною здатністю ніж ацетилен-киснева горюча детонаційно-газова суміш. За такої умови досягається найменша ступінь знеуглецювання карбідної складової і менш інтенсивне утворення у

структурі покриття крихких інтерметалічних сполук з меншою ніж у системах WC-Co, WC-Ni міжфазною когезійною міцністю.

9. Методом скінченно-елементного аналізу проведено розрахунок еквівалентних напружень (по Мізесу), що виникають у покритті і матеріалі основи від дії температур фрикційного нагріву. Задача вирішувалась на прикладі систем ГТН-покриття BK15-основа з різними варіантами матеріалу основи, товщин покриття 0,1...0,5мм, температур нагріву 50°C...300°C. За результатами моделювання встановлено, що внаслідок фрикційного нагріву в покритті виникають додаткові напруження, співмірні з когезійною міцністю покриття. Негативний вплив додаткових термічних напружень може бути мінімізований шляхом оптимізації співвідношення комплексу фізико-механічних і теплофізичних властивостей матеріалів покриття і основи та заходів, що сприятимуть зниженню температури фрикційного нагріву.

10. Розроблено еволюційну модель трибосистеми, яка встановлює закономірності зміни стану трибосистеми в умовах високотемпературного фретингу і визначає умови переходу від нормального зношування до недопустимого глибинного руйнування поверхонь тертя. Сформульовані загальні принципи вибору складу і способу конструювання структури матеріалів стійких до високотемпературного фретингового зношування. Теоретично обґрунтовано перспективність застосування для таких умов композиційних евтектичних сплавів системи Co(Cr; Al; Fe) - TiC та гарячепресованих матрично-наповнених порошкових псевдосплавів систем Co(Cr; Al; Fe) – TiC, Ni(Cr; Al; Fe) – TiC. Встановлено, що при температурах вищих за 1173K, умові найбільш високої зносостійкості відповідають порошкові композиційні псевдосплави з Ni-матрицею системи Ni(Cr; Al; Fe) – 50% об. TiC та сплави із матрицею на основі дисперснозміцненого жароміцного Ni – сплаву системи ЖС32 - 50% об. TiC. На основі аналізу процесів, що розвиваються в зоні трибологічного контакту, сформульовані системні уявлення щодо механізмів забезпечення високої зносостійкості зазначених матеріалів в умовах високотемпературної фретинг-корозії.

11. Для умов фретинг-корозійного зношування розроблено розрахунково-аналітичний метод оцінювання зносостійкості поверхневих шарів, який описує зміну стану матеріалу поверхневого шару та дозволяє визначати умову його фрикційного руйнування. В основу методу покладено розв'язування зносоконтактної задачі, що ґрунтується на енергетичній моделі трибо процесу, положеннях термодинаміки відкритих систем та енергетичній концепції міцності твердих кристалічних тіл. Умова фрикційного руйнування визначається кількістю циклів фретингу за якої відбувається відокремлення елементарного фрагменту поверхні об'ємом, обмеженим напівсферою з діаметром, співмірним діаметру плями фактичного контакту.

12. Розроблено та запропоновано для практичного використання ряд технологічних методів, спрямованих на підвищення стійкості до фретинг-корозійного зношування функціональних поверхонь деталей авіаційних трибомеханічних систем:

– для підвищення контактної міцності і зносостійкості ГТН-покриттів із евтектичних сплавів на основі Fe з тугоплавкими сполуками втілення розроблено та

захищено патентами спосіб модифікування дискретною ЛО в режимі ТЦО і оплавлення. За оптимального співвідношення площ вихідної і ЛО модифікованої поверхонь зносостійкість покриттів підданих ЛО термоциклюванням і ЛО оплавленням зросла відповідно у 1,8 і 2 рази;

- запропоновано спосіб формування ГТН-покриттів підвищеної зносостійкості і адгезійно-когезійної міцності. Спосіб включає попереднє нанесення покриття з дискретно-фрагментованим шаром з наступною інфільтрацією второпластово-графітовою водною суспензією. Зносостійкість плазмових покриттів з дискретно-фрагментованою структурою і фторопластово-графітовим заповнювачем підвищується у 6-8 разів, а величина сталого коефіцієнта тертя зменшується у 3-4 рази порівняно з такими ж покриттями напиленими суцільним шаром;

- розроблено та захищено патентом спосіб підвищення опору контактнотомному руйнуванню твердих тонкоплівкових покриттів, який полягає у попередньому зміцненні матеріалу основи поверхнево-пластичним деформуванням. Контактна втома іонно-плазмового покриття, нанесеного на зміцнену за розробленим способом поверхню сплаву ВТ3-1, зросла порівняно із зміцненням поверхні згідно прототипу ультразвуковим методом, на 20...40%, а стійкість до фретинг-корозійного зношування у 1,6 рази;

- розроблено та захищено патентом спосіб дискретної лазерної обробки азотованої сталі. На прикладі робочої поверхні гвинтів КГМ показано, що за умов високих контактних навантажень зносостійкість азотованої сталі 30Х2НВФА при фретинг-корозії без мащення зросла у 2 рази, а з мащенням консистентним мастилом «Ера» у 5 разів порівняно із азотуванням за стандартною технологією;

- встановлено, що ефективним технологічним методом для запобігання інтенсивному руйнуванню деталей із високоміцних $\alpha+\beta$ -титанових сплавів у фретинг-парі із алюмінієвим сплавом Д16Т, є термодифузійне оксинітрування титанового сплаву із контрольованого газового середовища, поєднане в одному технологічному циклі із старінням та наступним нанесенням на зміцнену поверхню шару твердомастильного покриття типу ВАП. За такого способу оброблення зносостійкість титанового сплаву ВТ22 порівняно із вихідним станом підвищилась у 2...3 рази. Одночасно зменшується адгезійна складова руйнування алюмінієвого сплаву, а поєднання термодифузійного насичення в одному технологічному циклі із старінням, забезпечує необхідний регламентований рівень міцності титанового сплаву;

- розроблено технологічні заходи з підвищення втомно-циклічної міцності деталей з ГТН-покриттями та технологічні рекомендації з вибору способу та матеріалу для відновлення зношених деталей із титанових сплавів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

У монографіях:

1. Організація і триботехнології авіаремонтного виробництва / А.П. Кудрін, О. І. Духота, М. В. Кіндрачук, Г. М. Зайвенко. – К. : НАУ, 2015. – 212 с.

2. Analysis of the fretting process of surface layers based on the energy model of triboprocess/ M. Kindrachuk, V. Kramar, O. Dukhota, V. Loburak// Study of problems in modern science: new technologies in engineering, advanced management, efficiency of social institutions: [collective monograph]; edited by Y. Shalapko, Z. Wyszowska, J. Musial, O. Paraska.- Bydgoszcz : University of Technology and Life Sciences, 2015. – P. 396-403.

У фахових виданнях:

3. Духота А. И. Изнашивание деталей авиационной техники в условиях динамического контактного нагружения / А. И. Духота, В. Б. Сидоров, В. В. Малышкин // Проблеми експлуатації та надійності авіаційної техніки : зб. наук. пр. – К. : КМУЦА, 1998. – С. 82-84.

4. Методологія оцінювання ремонтпридатності для вибору методу відновлення зношених деталей / В. Б. Сідоров, В. О. Краля, О. І. Духота, Д. О. Пугачевський // Проблеми тертя та зношування : наук.-техн. зб. Вип.45 – К. : НАУ, 2006. – С. 47-53.

5. Особенности технологии восстановления зношенных деталей из титановых сплавов / А. П. Кудрин, А. И. Духота, В. В. Готун, В. В. Жигинас // Проблеми тертя та зношування : наук.-техн. зб. Вип. 47 – К. : НАУ, 2007. – С. 197-206.

6. Абразивная стойкость электроискровых и комбинированных лазерно-электроискровых покрытий на легких сплавах / А. И. Духота, В. Ф. Лабунец, В. В. Жигинас, А. И. Подчерняева, В. М. Панашенко, Т. В. Мосина, В. П. Стеценко. // Проблеми тертя та зношування : наук.-техн. зб. Вип. 48 – К. : НАУ, 2007. – С. 185-195.

7. Духота О. І. Проблемні питання використання титанових сплавів у вузлах тертя авіаційної техніки / О. І. Духота, М. В. Кіндрачук, В. Ф. Лабунець // Проблеми тертя та зношування : наук.-техн. зб. Вип. 49 – К. : НАУ, 2008. – Т. 1. – С. 14-26.

8. Духота О. І. Технологічні аспекти забезпечення працездатності циклічно-навантажених деталей вузлів тертя з газотермічними покриттями / О. І. Духота, М. В. Кіндрачук, В. Ю. Потягов // Проблеми трибології. – 2009. - № 1 (51). – С. 81-84.

9. Фретингостійкість дискретних поверхонь в умовах граничного тертя / В. Є. Марчук, О. І. Духота, Ю. О. Градинський, О. М. Єнін // Вісник Харківського НТУСГ ім. Петра Василенка. Вип. 100. – Харків : Вид-во Харківського НТУСГ ім. Петра Василенка, 2010. – С. 147-152.

10. Духота О. І. Дослідження зносостійкості композиційних сплавів на основі кобальту в умовах високотемпературного фретингу / О. І. Духота, О. В. Тісов // Проблеми тертя та зношування : наук.-техн. зб. Вип. 53. – К. : НАУ, 2010. – С. 195-200.

11. Композиційні сплави для зміцнення контактних поверхонь бандажних полиць газотурбінних двигунів / О. І. Духота, М. В. Кіндрачук, О. В. Тісов, Т. С. Черепова // Проблеми трибології. – 2010. - №4. – С. 101-104.

12. Марчук В.Е. Дослідження зносостійкості електроіскрових покриттів в умовах фретинг-зношування / В. Е. Марчук, О. І. Духота, Н. О. Науменко // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. Вип. 56. – К. : НАУ, 2011. – С. 84-93.
13. Прогнозування високотемпературного окиснення жароміцних сплавів системи Co-TiC / О. В. Тісов, О. І. Духота, Т. С. Черепова, В. Ф. Литвиненко, Н. А. Медведева. – Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. Вип. 57. – К. : НАУ, 2012. – С. 163 – 169.
14. Фретинг-втома сталі 30ХГСА з дискретно-структурованою лунковою поверхнею / Г. В. Цибаньов, В. Е. Марчук, О. І. Духота, Ю. О. Градинський // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. / Нац. Аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского “ХАИ”. Вып. 3 (71). – 2012. – С. 124 – 127.
15. Марчук В. Є. Вплив параметрів дискретно-лункових поверхонь контакту на фретингостійкість конструкційної сталі в умовах граничного навантаження / В. Є. Марчук, А. П. Кудрін, О. І. Духота // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. Вип. 58. – К. : НАУ, 2012. – С. 58 – 64.
16. Кинетика и механизм фреттинг-корозии электроискровых ZrB_2 – содержащих покрытий на сплаве ВТЗ-1. / И. А. Подчерняева, А. И. Духота, В. М. Панашенко, А. Д. Панасюк, А. М. Блошакевич, М. А. Василевская. // Проблеми трибології. – 2012. - №1. – С. 62 -71.
17. Особенности формирования и трибологического поведения износостойких ZrB_2 – содержащих электроискровых и лазерно-электроискровых покрытий на титановом сплаве. / И. А. Подчерняева, В. М. Панашенко, А. И. Духота, А. Д. Панасюк, // Проблеми трибології. – 2012. - №4. – С. 53 – 57.
18. Духота О. І. Зносостійкість матеріалів трибомеханічних систем при динамічному контактному навантаженні / О. І. Духота, Н. О. Науменко, В. І. Костючек // Проблеми тертя та зношування. Вип. 59. – 2013. – С. 30 – 35.
19. Захист поверхонь тертя дискретними поверхнями / В. Є. Марчук, Б. А. Ляшенко, М. В. Кіндрачук, О. І. Духота // Проблеми тертя та зношування. – 2013. – №2 (61). – С. 80 – 87.
20. Сучасні тенденції в дослідженнях та розробленні матеріалів для використання в умовах високотемпературної фретинг-корозії / М. В. Кіндрачук, О. І. Духота, О. В.Тісов, Т. С. Черепова // Машинознавство. – 2013. - № 3-4 (189-190). – С. 40 – 43.
21. Комплексний підхід до вибору матеріалів пар тертя, що піддаються фретинг-корозійному зношуванню / О. І. Духота, М. В. Кіндрачук, Н. О. Науменко, Л. Р. Кіндрачук, В. В. Харченко. // Проблеми тертя та зношування. – 2014. - №4 (65). – С. 19 – 28.
22. Духота О. І. Еволюційна модель трибосистеми та загальні принципи забезпечення зносостійкості матеріалів в умовах високотемпературного фретингу / О. І. Духота // Проблеми тертя та зношування. – 2015. - №4 (69). – С. 10 – 20.

23. Духота О. І. Концептуальний підхід до створення поверхнево-модифікованих шарів і захисних покриттів підвищеної зносостійкості/ О. І. Духота // Проблеми тертя та зношування. – 2017. – №1 (74). – С. 97 – 103.

24. Триботехнічні дослідження високотемпературних зносостійких матрично-наповнених сплавів / О. І. Духота, О. В. Тісов, Т. С. Черепова, Г. П. Дмитрієва // Проблеми тертя та зношування. – 2017. – №3 (76). – С. 60-66.

25. Дослідження впливу геометрії контакту елементів трибопари на фретинг-корозійне зношування /О. І. Духота, А. О. Корнієнко, В. В. Харченко, Н. О. Науменко, І. В. Костецький, М. А. Гловин. // Проблеми тертя та зношування. – 2018. - № 1(78). – С. 50 – 66.

26. Дослідження впливу технологічних параметрів формування дискретно-текстурованих мастилоємних поверхонь на фретингостійкість трибосистем / М. В. Кіндрачук, О. І. Духота, В. Є. Марчук, Н. О. Науменко. // Проблеми тертя та зношування. – 2018. – № 2(79). – С. 4-15.

У іноземних спеціалізованих виданнях і виданнях України, які внесені до реєстру міжнародних наукометричних баз даних:

27. Ильинский И. И. Исследование вероятностных характеристик величины фреттинг-износа / И. И. Ильинский, А. И. Духота, А. П. Круглик // Трение и износ. – 1989. – Т. 10, № 6. – С. 1066 – 1069. [Trenie I Iznos, 1989, 10(6), С. 1066-1069].

28. Электроискровое упрочнение титанового сплава ВТЗ-1 безвольфрамовой композиционной керамикой / И. А. Подчерняева, В. М. Панашенко, А. Д. Панасюк, О. Н. Григорьев, А. И. Духота, В. Ф. Лабунец, В. В. Жигинас. // Порошковая металлургия. – 2007. - № 9/10. – С. 36 – 44. [Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 2007, 46 (9-10), С. 442-448].

29. Закономерности абразивного изнашивания ZrB_2 – содержащих электроискровых и комбинированных покрытий на титановом сплаве . П. Абразивное изнашивание нежестко закрепленным абразивом ZrB_2 – содержащих покрытий / И. А. Подчерняева, А. Д. Панасюк, В. М. Панашенко, О. П. Григорьев, А. И. Духота, В. В. Жигинас. // Порошковая металлургия. – 2009. - № 7/8. – С. 87-94. [Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 2009, 48 (7-8), С. 435-440].

30. Структурно-фазовые превращения на поверхности лазерно-электроискрового покрытия в условиях фреттинг-коррозии на воздухе / В. М. Панашенко, И. А. Подчерняева, А. И. Духота, А. Д. Панасюк. // Порошковая металлургия. – 2012. - № 1/2. – С. 142 – 152. [Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 2012, 51 (1-2), С. 112-120].

31. Вплив низькотемпературного оксидування та оксидонітрування на фретинг-корозію титанового сплаву ВТ22 / О. І. Духота, І. М. Погрелюк, О. Г.

Моляр, А. Т. Пічугін, О. Т. Лук'яненко, . // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2012. – Т. 48, № 2. – С. 85 – 90. [Material Science, 2012, 48(2), С. 213-218].

32. Властивості нікелевих порошкових сплавів, зміцнених карбідом титану / Т. С. Черепова, Г. П. Дмитрієва, О. І. Духота, М. В. Кіндрачук // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2016. – Т. 52, № 2. – С. 29 – 34. [Material Science, 2015, 52(2), С. 173-179].

33. Дослідження властивостей порошкових сплавів ЖС32 ВИ з карбідом титану / Т. С. Черепова, Г. П. Дмитрієва, О. І. Духота, В. І. Нечипоренко // Порошковая металлургия. – 2017. - № 11/12. - С. 68-75. [Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 2017, 56 (11-12), С. 664-669].

34. Термодифузійне насичення поверхні титанового сплаву ВТ22 з контрольованого кисневоазотомісного газового середовища на стадії старіння / В. М. Федірко, І. М. Погрелюк, О. Г. Лук'яненко, С. М. Лавриць, М. В. Кіндрачук, О. І. Духота, О. В. Тісов, В. В. Загребельний. // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2017. – Т. 53, № 5. – С. 100-109. [Material Science, 2018, 53(5), С. 691-701].

Матеріали та тези конференцій:

35. Краля В. А. Восстановление бандажных полок лопаток компрессоров ГТД / В. А. Краля, В. Б. Сидоров, А. И. Духота // Динамика роторных систем : сб. тр. II Международной конф., 24-26 июня 1998 г. – Хмельницкий: – ХТУ, 1998. – С. 125 – 128.

36. Підвищення фретингостійкості робочих лопаток турбін ГТД / В. В. Шевеля, Г. А. Калда, О. І. Духота, В. Б. Сідоров // Динамика роторних систем: сб.тр. II Международной конф., 24-26 июня 1998 г. – Хмельницкий : ХТУ, 1998. – С. 129 - 132.

37. Повышение износостойкости титанового сплава ВТ3-1 в условиях фреттинг-коррозии электроискровым упрочнением композиционной керамикой / И. А. Подчерняева, А. Д. Панасюк, В. М. Панашенко, А. И. Духота. // Авіа-2007: матеріали VIII міжнар. наук.-техн. конф., 25-27 квітня 2007. Т. 2. – К. : НАУ, 2007. – С. 32.52 – 32.56.

38. Духота О. І. Вплив напружено-деформованого стану на зношуваність композиційних матеріалів / О. І. Духота, О. В. Тісов, Г. А. Волосович // Авіа-2009: матеріали IX міжнар. наук.-техн. конф. 21-23 вересня 2009. – К. : НАУ, 2009. – С. 14.13 – 14.16.

39. Закономерности фреттинг-коррозии $ZrBr_2$ – содержащих электроискровых покрытий на титановых сплавах / И. А. Подчерняева, А. И. Духота, В. М. Панашенко, А. Д. Панасюк // Материаловедение тугоплавких соединений : труды II-ой Междунар. Самсоновская конф., 18-20 мая 2010 г. – К. : НТУУ “КПИ”, 2010. – С. 100.

40. Системний підхід до оцінки ремонтпридатності та вибору метода відновлення деталей, що пошкоджуються фреттинг-корозією / А. П. Кудрін, О. І. Духота, В. В. Жигінас, О. В. Мельник // Сучасні проблеми трибології : тези доп.

Міжнар. наук. - техн. конф., 19-21 травня 2010. – К.: ІВЦ АЛКОН НАН України, 2010. – С. 149.

41. Перспективні напрями забезпечення працездатності деталей авіаційних трибосистем, що працюють в умовах фретинг-контактної взаємодії / М. Кіндрачук, О. Духота, О. Тісов, С. Клопенко // 11-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові, 15-17 травня 2013 р. : тези доп. – Львів : КІНПАТРИ ЛТД, 2013. – С. 7.

42. Процеси зношування у трибосистемах з дискретно-текстурованою поверхнею / В. Є. Марчук, Б. А. Ляшенко, О. І. Духота, В. І. Морозов, І. С. Будьоний. // Авіа-2013 : матеріали XI Міжнар. наук.-техн. конф., 21–23 травня 2013 р. Т 3. – К. : НАУ, 2013. – С. 15.45 – 15.46.

43. Wear resistant protective material for rotor blades of aircraft turbine engines / T. Cherepova, G. Dmitrieva, A. Dukhota, M. Kindrachuk, O. Tisov. // Aviation in the XXI-st. century: Safety in aviation and Space technologies : proceedings Sixth world congress, 23–25 September/ Vol. 1. – К. : НАУ, 2014. – Р. 1.1.26 – 1.1.30.

44. Кіндрачук М. Трибологічні аспекти інженерії фретингостійких поверхонь / М. Кіндрачук, О. Духота, Н. Наumenко // тези допов. 12-й Міжнародний симп. інженерів-механіків у Львові, 28–29 травня 2015 р.: – Львів : КІНПАТРИ ЛТД. – 2015. – С. 130.

45. Духота О. І. Зносостійкість композиційних газотермічних покриттів за умов фретинг-корозійного зношування / О. І. Духота, Н. О. Наumenко, Л. В. Богач // Матеріали для роботи в екстремальних умовах : матеріали V Міжнар. наук. конф., 3 – 5 грудня 2015 р. – К.: НТУУ “КПІ”. – 2015. – С. 148 – 150.

46. Аналіз фретингового руйнування поверхневих шарів на основі енергетичної моделі трибопроцесу/ М. Кіндрачук, В. Крамар, О. Духота, В. Лабурак // VI Ukrainian-Polish Scientific Dialogues : The International scientific and technical conference, 21–24 October 2015 year, Khmelnytsky. – KNU, 2015. – Р. 87 – 88.

47. Критерії оцінювання працездатності та вибору матеріалів пар тертя за умов зношування при фретинг-корозії і динамічному ударному контактному навантаженні / О. Духота, Н. Наumenко, М. Кіндрачук, А. Кудрін // Теорія і практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій: матеріали 5 Міжнар. наук.-техн. конф., 27–28 жовтня 2016 р. – Львів : КІНПАТРИ ЛТД, 2017. – С. 7 – 9.

48. Зносостійкі порошкові сплави на основі кобальту і нікелю з карбідним зміцненням / Т. Черепова, Г. Дмитрієва, М. Кіндрачук, О. Духота, О. В. Тісов. // 13-й Міжнародний симпозіум українських інженерів механіків у Львові, 18-19 травня 2017 р.: матеріали симп. – Львів : Львівська політехніка, 2017. – С. 16.

Патенти та свідоцтва:

49. А. с. № 1283608. Устройство для испытания материалов на фреттинг-коррозию / Н. С. Кулагин, В. В. Волков, А. И. Духота; заявл. 23.07.1985 ; опубл. 15.01.1987, Бюл. № 2. – 3с.

50. Пат. 45548. Україна, МПК С 23 С4/18. Спосіб формування зносостійкого дискретного плазмового покриття / Кіндрачук М. В., Духота О. І. Шевченко О. Л., Тісов О. В., Потягов В. Ю., Корбут Є. В. - № u2009 06957; заявл. 03.07.2009 ; опубл. 10.11.2009, Бюл. № 21. – 6 с.

51. Пат. 45549. Україна, МПК С 23 С 8/80. Спосіб дискретної обробки азотованих сталевих виробів / Кіндрачук М. В., Духота О. І., Шевченко О. Л., Головка Л. Ф., Корбут Є. В., Кіндрачук В. М. - № u2009 06958 ; заявл. 03.07.2009 ; опубл. 10.11.2009, Бюл. № 21. – 6 с.

52. Пат. 89119, МПК С04В 35/58. Керамічний антифрикційний високотемпературний матеріал на основі дибоксиду цирконію / Подчерняєва І. О., Панасюк А. Д., Понащенко В. М., Григор'єв О. М, Лабунець В. Ф., Духота О. І., Супрунович О. С. - № u2008 06545 ; заявл. 15.05.2008 ; опубл. 25.11.2009, Бюл. № 24. – 6 с.

53. Пат. 65209, МПК С23С 4/18 (2006.01). Спосіб формування зносостійких газотермічних покриттів термоциклюванням лазером / Кіндрачук М. В., Духота О. І., Головка Л. Ф., Тісов О. В., Шевченко О. Л., Хагерізаде Рудан Мейсам Хабіб. - № u2011 06509 ; заявл. 24.05.2011 ; опубл. 25.11.2011, Бюл. № 22. – 6 с.

54. Пат. 69065, МПК с22с 19/07 (2006.01), с22с 29/10 (2006.01). Зносостійкий композиційний сплав на основі кобальту / Черепова Т. С., Кіндрачук М. В., Духота О. І., Тісов О. В.. - № u201109497; заявл. 28.07.2011, опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8. – 3 с.

55. Пат. 98452, МПК с23с 14/00 (2015.01). Спосіб отримання твердого покриття з підвищенням опором втомному руйнуванню на поверхні металевого виробу / Кіндрачук М. В., Духота О. І. Кудрін А. П., Тісов О. В., Мікосянчик О. О., Науменко Н. О. - № u2014 12654 ; заявл. 25.11.2014 ; опубл. 27.04.2015, Бюл. № 8. – 6 с.

56. Пат. 111036, МПК а2015 01039. Зносостійкий нікелевий сплав / Черепова Т. С., Дмитрієва Г. П., Духота О. І., Кіндрачук М. В. - № u2015 1039 ; заявл. 10.02.15; опубл. 10.07.2015, Бюл. № 13. – 4 с.

АНОТАЦІЯ

Духота О.І. Науково-технічні основи підвищення довговічності деталей авіаційних трибомеханічних систем за умов їх фреттинг-контактної взаємодії. - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.04. «Тертя та зношування в машинах» (13 – Механічна інженерія). – Національний авіаційний університет, Київ, 2019.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-технічної проблеми підвищення довговічності деталей авіаційних трибомеханічних систем, що працюють в умовах фретинг-контактної взаємодії, шляхом створення способів формування функціональних поверхонь і матеріалів з необхідними керованими властивостями та методів оцінювання і прогнозування фретинг-корозійної сумісності і зносостійкості елементів трибосистем.

Визначено вплив природи матеріалів контактної пари, геометрії контакту і параметрів фретингу на закономірності фретинг-корозійного зношування. Запропоновано критерій та розрахунково-аналітичний метод оцінювання фретинг-корозійної сумісності матеріалів. З урахуванням специфіки механізму фретинг-корозійного зношування сформульовані загальні принципи створення поверхнево-модифікованих шарів і захисних покриттів підвищеної зносостійкості. Представлено і описано результати експериментальних досліджень з визначення впливу технологічних параметрів їх формування і параметрів фретингу на фрикційно-зносні характеристики трибосистем. Теоретично обґрунтовано і експериментально доведено перспективність застосування в якості зносостійких матеріалів для трибовузлів, що працюють в умовах високотемпературного фретингу, евтектичних сплавів системи $\text{Co}(\text{Cr}; \text{Al}; \text{Fe}) - \text{TiC}$ та порошкових гарячепресованих матрично-наповнених псевдосплавів систем $\text{Co}(\text{Cr}; \text{Al}; \text{Fe}) - \text{TiC}$, $\text{Ni}(\text{Cr}; \text{Al}; \text{Fe}) - \text{TiC}$.

Розроблено аналітично-розрахунковий метод оцінювання фретингостійкості поверхневих шарів, який дозволяє аналізувати зміну стану матеріалу поверхневого шару і визначати енергетичні умови його фрикційного руйнування. Розроблено та запропоновано для практичного використання ряд технологічних заходів, спрямованих на підвищення довговічності деталей авіаційних трибомеханічних систем. Експериментально доведено, що одним із ефективних шляхів досягнення високої зносостійкості і контактної міцності поверхонь трибоелементів, за умови їх фретинг-контактної взаємодії, є створення робочого шару з градієнтною макроретерогенною структурою та структурою дискретного типу.

Ключові слова: авіаційна техніка, трибомеханічна система, фретинг, фретинг-корозія, зносостійкість, довговічність, методи інженерії зносостійких поверхонь.

АННОТАЦИЯ

Духота А.И. Научно-технические основы повышения долговечности деталей авиационных трибомеханических систем в условиях их фреттинг-контактного взаимодействия.—На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.04 «Трение износ в машинах» (13—Механическая инженерия).— Национальный авиационный университет, Киев, 2019.

Диссертационная работа посвящена решению научно-технической проблемы повышения долговечности деталей авиационных трибомеханических систем, работающих в условиях фреттинг-контактного взаимодействия, путем создания способов формирования функциональных поверхностей и материалов с необходимыми управляемыми свойствами, методов оценки и прогнозирования фреттинг-коррозионной совместимости и износостойкости элементов трибосистем.

Определено влияние природы материалов контактной пары; геометрии контакта и параметров фреттинга на закономерности фреттинг-коррозионного изнашивания. Для трибосистем, потеря работоспособности которых связана с накоплением в зоне трибоконтакта и расклинивающим действием продуктов изнашивания, предложено критерий и расчетно-аналитический метод оценки фреттинг-коррозионной совместимости материалов. Установлено, что статистические характеристики рассеивания значений фреттинг-износа увеличиваются с увеличением амплитуды фреттинга и удельной контактной нагрузки. Раскрыто механизм интенсификации изнашивания при условии одновременного действия тангенциальных виброперемещений и нормальных к поверхности контакта ударных динамических нагрузок.

С учетом специфики механизма фреттинг-коррозионного изнашивания сформулированы общие принципы создания поверхностно-модифицированных слоев и защитных покрытий повышенной износостойкости. Представлены результаты экспериментальных исследований по определению влияния технологических параметров их формирования и параметров фреттинга на фрикционно-износные характеристики трибосистем. На примере трибосистемы, где функции рабочей поверхности выполняет слой износостойкого газотермического покрытия WC-Co, методом конечно-элементарного анализа определены закономерности распределения напряжений, которые возникают в покрытии и материале основы под действием температур фрикционного нагрева.

Разработано эволюционную модель трибосистемы, которая устанавливает закономерности изменения состояния элементов трибосистемы в условиях высокотемпературного фреттинга и определяет условия перехода от нормального изнашивания к недопустимому глубинному разрушению поверхности трения. Теоретически и экспериментально обосновано перспективность применения в качестве износостойких материалов для трибоузлов, работающих в условиях высокотемпературного фреттинга, эвтектических сплавов системы $\text{Co}(\text{Cr}; \text{Al}; \text{Fe}) - \text{TiC}$ и порошковых горячепрессованных матрично-наполненных псевдосплавов системы $\text{Co}(\text{Cr}; \text{Al}; \text{Fe}) - \text{TiC}$, $\text{Ni}(\text{Cr}; \text{Al}; \text{Fe}) - \text{TiC}$.

Разработан аналитически-расчетный метод оценки фреттингостойкости, который дает возможность анализировать изменение состояния материала

поверхностного слоя и определять энергетические условия, его фрикционные разрушения.

Экспериментально обосновано, что одним из эффективных путей достижения высокой износостойкости и контактной прочности поверхностей трибоэлементов при фреттинг-контактном взаимодействии есть создание рабочего слоя с градиентной макроструктурой и структурой дискретного типа.

Разработанные в работе функциональные износостойкие материалы и способы формирования износостойких поверхностей прошли производственную апробацию.

Ключевые слова: авиационная техника, трибомеханическая система, фреттинг, фреттинг-коррозия, износостойкость, долговечность, методы инженерии износостойких поверхностей.

SUMMARY

Dukhta O.I. Scientific and technical bases for durability increasing of elements of aviation tribomechanical systems in the conditions of fretting-contact interaction. - On the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.02.04 "Friction and wear in machines" (13 - Mechanical engineering). - National Aviation University, Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to the solution of the scientific and technical problem of increasing the durability of aviation tribomechanical systems elements operating in the conditions of fretting-contact interaction, by creating methods for the formation of functional surfaces and materials with necessary controllable properties and methods for estimating and predicting fretting-corrosion compatibility and wear resistance of tribosystem elements.

The influence of the nature of the contact pair materials, contact geometry and fretting parameters on the regularities of fretting-corrosion wear is determined. The criterion and calculation-analytical method of estimation of fretting-corrosion compatibility of materials is offered. Taking into account the specificity of the mechanism of fretting-corrosion wear, the general principles of creating surface-modified layers and protective coatings of high wear resistance are formulated. The results of experimental studies on the influence of technological parameters of their formation and parameters of fretting on the friction-wear characteristics of tribosystems are presented and described. Theoretically founded and experimentally proved the perspective of application of eutectic alloys of the system Cu (Cr; Al; Fe)-TiC and powdered hot-pressed matrix-filled pseudoalloys of the systems Cu (Cr, Al, Fe) -TiC, Ni (Cr; Al; Fe)-TiC as wear-resistant materials for tribounits operating in high-temperature fretting.

The analytical-calculated method of estimating the fretting stability of the surface layers is developed. The method allows to analyze the change in the material state of the

surface layer and to determine the energy conditions for its frictional destruction. A number of technological procedures aimed at increasing the durability of aircraft tribomechanical systems elements have been developed and proposed for practical use. It has been experimentally proved that one of the effective ways to achieve high wear resistance and contact strength of surfaces of triboelements operating in fretting-contact interaction is to create a working layer with a gradient macroheterogenic and discrete-type structures.

Key words: aviation technology, tribomechanical system, fretting, fretting-corrosion, wear resistance, durability, methods of wear-resistant surfaces engineering.